Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Magneetvelden nabij Rokkeveen: meting voor en na ingebruikname van een nieuwe hoogspanningslijn

RIVM rapport 2014-0134

G. Kelfkens et al.

Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Magneetvelden nabij Rokkeveen: meting voor en na ingebruikname van een nieuwe hoogspanningslijn

RIVM Rapport 2014-0134

Colofon

G. Kelfkens, Centrum Duurzaamheid, Milieu en Gezondheid
M.A.M. Beerlage, Centrum Duurzaamheid, Milieu en Gezondheid
J.F.B. Bolte, Centrum Duurzaamheid, Milieu en Gezondheid
M.J.M. Pruppers, Centrum Duurzaamheid, Milieu en Gezondheid

Contact:
Mathieu Pruppers
Centrum Duurzaamheid, Milieu en Gezondheid
mathieu.pruppers@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Milieu, Directoraat-Generaal Milieu en Internationaal, directie Veiligheid en Risico's in het kader van project 'M/610790/10/HB Elektromagnetische velden'

Dit is een uitgave van:

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
www.rivm.nl

Publiekssamenvatting

Magneetvelden nabij Rokkeveen: meting voor en na ingebruikname van een nieuwe hoogspanningslijn

Het RIVM heeft nabij Rokkeveen magneetveldmetingen uitgevoerd vóór- en nadat een nieuwe hoogspanningslijn (Randstad 380 kV-verbinding) in gebruik is genomen. In de buurt van de grens van de magneetveldzone, bleken de meetresultaten voldoende overeen te komen met de berekeningen van het magneetveld. De afwijking van maximaal 5 meter die het ministerie van Infrastructuur en Milieu (IenM) rond de zonegrens acceptabel vindt, werd niet overschreden. Het rekenvoorschrift is daarom goed te gebruiken om te bepalen waar de zonegrens ligt.

Bij de aanleg van nieuwe hoogspanningslijnen is het vooraf alleen mogelijk om het magneetveld te berekenen. Sommige omwonenden van (nieuwe) lijnen vragen zich af of berekende magneetvelden overeenkomen met gemeten magneetvelden. Zij geven aan meer vertrouwen te hebben in metingen.

Sinds 2005 hanteert de Nederlandse overheid uit voorzorg bij bovengrondse hoogspanningslijnen een berekende magneetveldzone. Dit is de strook grond die zich aan beide zijden langs de bovengrondse hoogspanningslijn uitstrekt en waarbinnen het magneetveld gemiddeld over een jaar, nu en in de toekomst, sterker kan zijn dan 0,4 microtesla, de maat voor de sterkte van het magneetveld. De Rijksoverheid adviseert om ervoor te zorgen dat in nieuwe situaties binnen deze zone zo weinig mogelijk woningen, scholen, crèches en kinderdagopvangplaatsen komen te liggen.

De metingen zijn verricht nadat de stichting 'De Groene Landscheiding N470' daartoe een verzoek had ingediend bij de ministers van Economische Zaken en van Infrastructuur en Milieu. Volgens de stichting is een dergelijke 'nulmeting' nodig om het additionele effect van de Randstad 380 kV-verbinding ondubbelzinnig vast te kunnen stellen. Het onderzoek is uitgevoerd in opdracht van het ministerie van IenM.

Trefwoorden: nieuwe bovengrondse hoogspanningslijn; magneetveldzone; berekeningen; metingen

Abstract

Magnetic fields near 'Rokkeveen': measurement before and after putting into operation of a new overhead power line

RIVM has performed measurements of magnetic fields near 'Rokkeveen' before and after bringing into use a new overhead power line ('Randstad 380 kV'). Near the location of the edge of the magnetic field zone, the results of the measurements were sufficiently equal to the results of the magnetic fields calculations. The deviation of 5 meter at the most, which is, near the zone limit, acceptable for the ministry of Infrastructure and the Environment, was not exceeded. Therefore, the calculation instructions are well applicable to determine the location of the zone limit.

In the planning process of a new overhead power line it is only possible to calculate the magnetic field. Some people living near (new) lines wonder whether calculated magnetic fields are similar to measured magnetic fields. They indicate to trust measurements more.

Since 2005 the Dutch government uses near overhead power lines, by way of precaution, a calculated magnetic field zone. This is the strip of land at both sides of the power line where, now and in the future, the yearly averaged magnetic field can be stronger than 0.4 microtesla, the unit for the magnetic field strength. The national government advices to take care that in new situations, within this zone as few as possible dwellings, schools, crèches, and day care facilities are situated.

The measurements haven been performed after the local pressure group 'De Groene Landscheiding N470' has made a request to the minister of Economic Affairs and the minister of Infrastructure and the Environment. According to the pressure group this type of measurements before and after is necessary to unambiguously determine the additional effect of the 'Randstad 380 kV' connection. The study is commissioned by the ministry of Infrastructure and the Environment.

Key words: new overhead power line; magnetic field zone; calculations; measurements

Inhoudsopgave

Dankwoord

Het RIVM bedankt de heer E. van de Ploeg uit Lansingerland voor het beschikbaar stellen van zijn perceel voor het opstellen van de meetapparatuur. Verder dankt het RIVM de medewerkers van TenneT: mevrouw Annemarie Slingenberg, de heren Paul Janssen en Kees Koreman en de medewerkers van het Asset Informatieloket.

Samenvatting

In Nederland is er voorzorgsbeleid in de buurt van bovengrondse hoogspanningslijnen. Doel van het beleid is te voorkomen dat er nieuwe situaties ontstaan waarin kinderen langdurig worden blootgesteld aan 50 Hz-magneetvelden die sterker zijn dan 0,4 microtesla. De uitwerking van het beleid is gebaseerd op een berekende magneetveldzone, gedefinieerd als het gebied waar het magneetveld gemiddeld over een jaar sterker is of in de toekomst sterker kan worden dan 0,4 microtesla. De zone kan alleen worden berekend omdat de berekening uitgaat van de toekomstige jaargemiddelde stroom. Het RIVM heeft een Handreiking voor de zoneberekening opgesteld.

Sommige mensen die in de buurt van hoogspanningslijnen wonen, vragen zich af of berekende (gemodelleerde) magneetvelden overeenkomen met gemeten magneetvelden. Zij geven aan meer vertrouwen te hebben in metingen en pleiten daarom voor metingen in de buurt van hoogspanningslijnen. In 2008 heeft de stichting 'De Groene Landscheiding N470' de ministers van EZ en VROM gevraagd om magneetveldmetingen bij de nieuwe hoogspanningslijn langs de Zoetermeerse wijk Rokkeveen te laten uitvoeren. Deze metingen zouden ook de situatie met betrekking tot de magneetvelden vast moeten leggen voordat de hoogspanningslijn in bedrijf werd genomen. Het verzoek van de stichting 'De Groene Landscheiding N470' werd ingewilligd en het ministerie van IenM vroeg het RIVM bij Rokkeveen magneetveldmetingen uit te voeren vóór en na ingebruikname van de nieuwe hoogspanningslijn.

Op de locatie nabij Rokkeveen zijn in 2012 de magneetvelden gemeten voordat de hoogspanningslijn in bedrijf was. Gemiddeld over 24 uur is het gemeten magneetveld overal nul. Er is geen meetbaar 50 Hz-achtergrondmagneetveld.

In 2013 zijn op dezelfde locatie de 50 Hz-magneetvelden gemeten nadat de lijn in bedrijf werd genomen. Met een rekenmodel zijn de magneetvelden in de buurt van de lijn berekend. De verschillen tussen model en meting zijn geanalyseerd. Uit een eerder validatieonderzoek bij een hoogspanningslijn in Maartensdijk is gebleken dat model en metingen voldoende overeenkomen voor afstanden groter dan ongeveer 40 m. Deze bevinding wordt bij de meting nabij Rokkeveen bevestigd. Tijdens de meting op de locatie nabij Rokkeveen hebben vier van de negen magneetveldmeters niet gedurende de gehele meetperiode van 24 uur gewerkt. Hoewel niet optimaal, blijven er voldoende metingen over om een valide vergelijking tussen model en metingen te kunnen maken.

Door de verschillen tussen gemodelleerde en gemeten magneetvelden kan de zone waar de 0,4 microtesla (jaargemiddeld) wordt overschreden, verschillen van de magneetveldzone die volgens de Handreiking wordt uitgerekend. Voor de situatie op de locatie nabij Rokkeveen blijkt dat de mogelijke verschillen binnen ±5 m liggen. Verschillen van ±5 m vindt het ministerie van IenM in de uitvoeringspraktijk van het voorzorgsbeleid acceptabel.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Tijdens opwekking, gebruik en transport van elektriciteit ontstaan magneetvelden met een frequentie van 50 Hz. Uit internationaal wetenschappelijk onderzoek is een samenhang gebleken tussen wonen in de buurt van hoogspanningslijnen en de kans op krijgen van leukemie door kinderen. Mogelijk speelt het magneetveld van de hoogspanningslijn daar een rol in, maar het is niet aangetoond dat het magneetveld de oorzaak is van de verhoogde kans op leukemie.

De Rijksoverheid heeft op grond van het voorzorgsprincipe beleid ontwikkeld. Dat beleid is eind 2005 vastgelegd in een advies aan gemeenten, provincies en netbeheerders [1] en in 2008 nader toegelicht [2]. Centraal in het beleid staat de magneetveldzone die is gedefinieerd als de strook grond die zich aan beide zijden langs de bovengrondse hoogspanningslijn uitstrekt en waarbinnen het magneetveld gemiddeld over een jaar hoger is dan of in de toekomst hoger kan worden dan 0,4 microtesla. Het RIVM heeft een Handreiking ontwikkeld voor het berekenen van de breedte van deze (specifieke) magneetveldzone [3].

Binnen dit beleid is gekozen voor een toekomstbestendige magneetveldzone op basis van berekeningen, niet op basis van metingen. Om deze toekomstbestendige magneetveldzone te bepalen, wordt niet uitgegaan van de stroom door de hoogspanningslijn op een bepaald moment, maar van de jaargemiddelde stroom die op basis van de technische eigenschappen van de lijn in de toekomst te verwachten is. De Rijksoverheid gaat daarbij uit van een bepaald percentage van de maximale belasting waarvoor een hoogspanningslijn is ontworpen. Voor het type lijn dat langs Rokkeveen loopt (380 kV) is dat percentage 30% van deze ontwerpbelasting. Die 30% is afgeleid uit een analyse van de jaargemiddelde belasting in 2003 [4]. De overheid heeft voor 30% gekozen omdat toen voor meer dan 90% van de 220 kV- en 380 kV-circuits de jaargemiddelde belasting lager was dan 30%.

Omdat de belasting van het hoogspanningsnet varieert, is er vooraf geen moment aan te geven waarop deze stroom (van 30% van de ontwerpbelasting) door de hoogspanningslijn loopt. Dat betekent dat het magneetveld dat bij die stroom hoort niet kan worden gemeten. Daarom kan deze toekomstbestendige magneetveldzone alleen worden berekend en niet worden gemeten. Bij de aanleg van nieuwe lijnen is berekenen vooraf ook de enige mogelijkheid.

Omwonenden van (nieuwe) hoogspanningslijnen vragen zich soms af of berekende magneetvelden overeenkomen met gemeten magneetvelden. Zij geven aan meer vertrouwen te hebben in metingen. Zij pleiten dan ook voor metingen bij hoogspanningslijnen.

Om aan deze vragen tegemoet te komen heeft het ministerie van Infrastructuur en Milieu het RIVM gevraagd op enkele locaties de magneetvelden in de buurt van een bovengrondse hoogspanningslijn te meten. De eerste metingen zijn uitgevoerd bij een hoogspanningslijn in Maartensdijk [5]. In dit validatieonderzoek zijn metingen van het magneetveld in de buurt van een hoogspanningslijn gedaan en vergeleken met de uitkomst van modelberekeningen. Voor de hier gepresenteerde metingen na ingebruikname

van de hoogspanningslijn langs de wijk Rokkeveen (Zoetermeer) is dezelfde methode gebruikt als in Maartensdijk.

Op de locatie nabij Rokkeveen is een extra meting uitgevoerd voordat de hoogspanningslijn in gebruik werd genomen. Deze zogenaamde 'nulmeting' is een gevolg van een verzoek van de stichting 'De Groene Landscheiding N470'. Deze stichting heeft in 2008 de ministers Van der Hoeven (EZ) en Cramer (VROM) gewezen op het belang van het vastleggen van de huidige toestand (zonder dat er stroom door de hoogspanningslijn loopt) met betrekking tot de magneetvelden bij Rokkeveen [6]. Zo'n 'nulmeting' is volgens de stichting nodig om het additionele effect van de Randstad 380 kV-verbinding ondubbelzinnig vast te kunnen stellen. In reactie op deze brief heeft de voormalige minister van VROM in 2009 toegezegd dat er bij deze nieuwe lijn ter hoogte van de wijk Rokkeveen een nulmeting zal worden gedaan. '*Ik ben bereid het RIVM te vragen in dat kader ook metingen te doen van de sterkte van het magnetische veld op enkele locaties in Rokkeveen waar de Randstad 380 kV volgens de momenteel lopende procedures gepland is langs te lopen, een zogenaamde nulmeting*' [7].

Voorafgaand aan de magneetveldmeting heeft het RIVM daarom in 2012 een nulmeting uitgevoerd voordat de hoogspanningslijn in gebruik werd genomen.

1.2 Vraagstelling

De vraagstelling voor de magneetveldmetingen op de locatie nabij Rokkeveen bestaat uit drie delen:

- Wat zijn de heersende magneetvelden voordat er stroom door de nieuwe hoogspanningslijn loopt?
- Zijn de verschillen tussen gemodelleerde en gemeten magneetvelden bij deze hoogspanningslijn (met de nieuwe Wintrack-masten) in overeenstemming met de resultaten van het validatieonderzoek in Maartensdijk?
- Wat betekenen de verschillen tussen metingen en modellen op de locatie nabij Rokkeveen voor de magneetveldsterkte buiten de magneetveldzone zoals die volgens de Handreiking is berekend?

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft de berekening van de sterkte van het magneetveld op basis van het gebruikte computermodel. In Hoofdstuk 3 wordt de meetmethode voor het magneetveld beschreven. Hoofdstuk 4 beschrijft de resultaten van de nulmeting en van de meting na ingebruikname. Hoofdstuk 5 bevat de bespreking van de resultaten en Hoofdstuk 6 de conclusies.

2 Modelberekeningen

2.1 Inleiding

Met het rekenmodel EFC-400[1] is het magneetveld in de buurt van de hoogspanningsverbinding Wateringen-Bleiswijk berekend. Het rekenmodel bepaalt een profiel van het magneetveld midden tussen masten 43 en 44. Het profiel is om de halve meter bepaald langs een lijn loodrecht op de hoogspanningslijn voor afstanden tussen 0 en 100 m.

Allereerst is een magneetveldprofiel berekend volgens de Handreiking. Daarbij is uitgegaan van de door het Asset Informatieloket van TenneT verstrekte gegevens in Bijlage 1 en een rekenstroom van 1200 A (= 30% van de ontwerpbelasting). Dit magneetveldprofiel wordt aangeduid als 'Handreikingsprofiel'.

Om de modeluitkomsten te kunnen vergelijken met de metingen is bepaald hoe het (gemodelleerde) magneetveld op de positie van de magneetveldmeters verandert met de stroom. Daarvoor zijn, aanvullend aan het Handreikingsprofiel, tien profielen berekend met stroomwaarden tussen 100 en 1000 A (stap 100 A). Uit deze profielen is het verband tussen gemodelleerd magneetveld en stroom op elke positie van de magneetveldmeters bepaald.

2.2 Onnauwkeurigheden in modelberekeningen

Bijlage 2 bevat een uitgebreide analyse van de onnauwkeurigheid in de resultaten van de modelberekening. De grootste bijdrage aan deze onnauwkeurigheid wordt geleverd door de onnauwkeurigheid in de gemeten stroom door de circuits. Daarnaast draagt ook de onnauwkeurigheid in de schatting van andere modelparameters (afmetingen, mastposities, doorhang, enzovoort) bij aan de onnauwkeurigheid in de modelberekening. In totaal bedraagt de onnauwkeurigheid in de modelberekeningen voor het magneetveld ongeveer 10,3% (Bijlage 2).

[1] EFC-400 is een commercieel verkrijgbaar softwarepakket (Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie, Berlijn; FGEU). Voor dit onderzoek heeft het RIVM versie 2008, build 2082 gebruikt.

3 Meetmethoden

3.1 Meetlocatie, positiebepaling en meetperiode

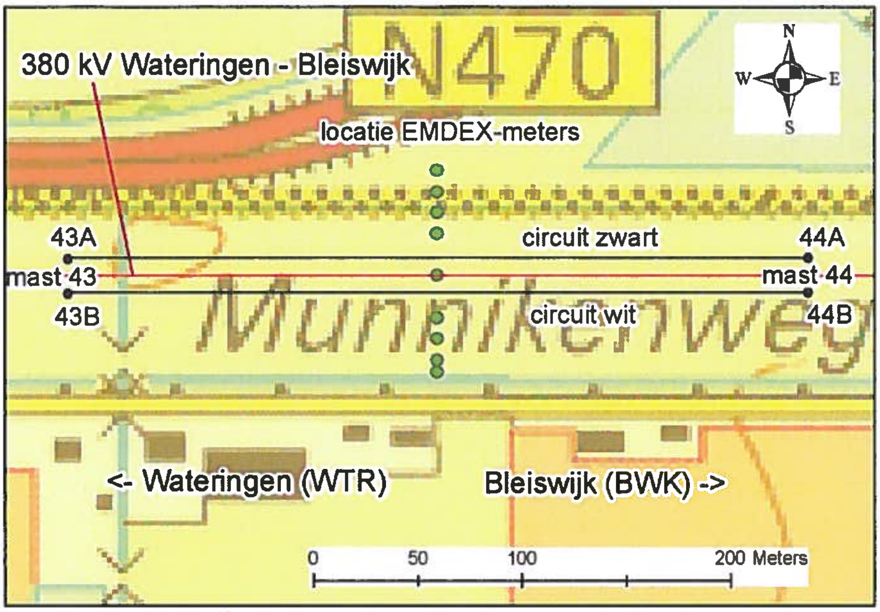
Meetlocatie

De metingen zijn uitgevoerd in een weiland tussen de N470 en de Munnikenweg (ter hoogte van nummer 18). Het grootste gedeelte van de meetlocatie (en de hoogspanningslijn zelf) bevindt zich op het grondgebied van de gemeente Lansingerland. Meetposities 8 en 9 (zie Figuur 2b) staan in het talud van de N470 in de gemeente Zoetermeer. De locatie is een strook grasland met een sloot aan weerszijden, waarop zo nu en dan schapen lopen (Figuur 1). Met de eigenaar, dhr. E. van de Ploeg, is contact opgenomen en hij heeft toestemming verleend om zijn perceel voor de metingen te betreden.

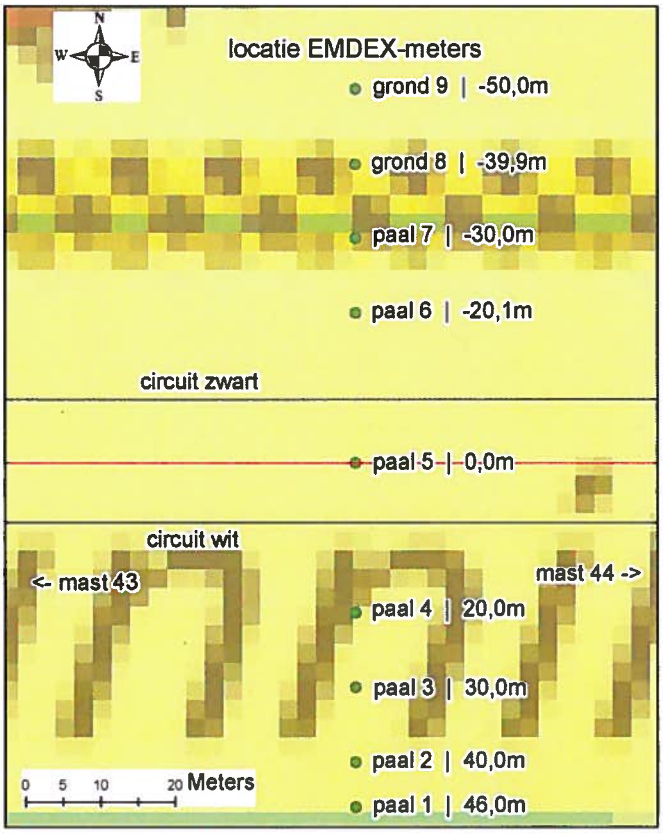


Figuur 1. Foto van de meetlocatie, kijkend naar het westen. Links zijn de woningen aan de Munnikenweg te zien en rechts loopt de N470

Postiebepaling



(a)



(b)

Figuur 2. De meetlocatie tussen mast 43 en mast 44 van de 380 kV-verbinding Wateringen-Bleiswijk: (a) geeft het overzicht en (b) de locaties van de meetpalen waaraan de magneetveldmeters zijn bevestigd

De 380 kV-hoogspanningslijn Wateringen-Bleiswijk is gerealiseerd op Wintrack-masten. Op elke mastpositie staan twee zogenaamde pylonen. Aan elke pyloon hangen drie geleiderbundels boven elkaar (zie Figuur 1). Zo'n groep van drie geleiderbundels wordt een circuit genoemd. De meeste hoogspanningslijnen hebben twee circuits om de kwetsbaarheid bij storingen te verkleinen. Ook de lijn Wateringen-Bleiswijk heeft twee circuits. De circuits worden aangeduid met een kleur. Voor Wateringen-Bleiswijk zijn dat circuit wit (zuidzijde) en circuit zwart (noordzijde). Naast de geleiders hangen er nog bliksemdraden (bovenaan) en compensatiedraden (onder de onderste geleider) aan de pylonen.

De metingen vinden plaats op de plek waar de geleiders het laagst hangen, midden tussen de masten 43 en 44, langs een lijn loodrecht op de hoogspanningslijn. De meters worden op 1 m hoogte bevestigd aan houten meetpalen. Er is voor een hoogte van 1 m gekozen omdat bij een berekening volgens de Handreiking ook een hoogte van 1 m boven het maaiveld wordt gehanteerd. De meetpalen worden zo goed mogelijk op vooraf vastgestelde posities geplaatst. De centrale meetpaal komt midden tussen de masten 43 en 44 op de hartlijn van de hoogspanningslijn. De Rijksdriehoekscoördinaten van dit punt zijn bepaald uit de door TenneT verstrekte mastlocaties. Om de centrale meetpaal zo goed mogelijk op het hart van de lijn te plaatsen wordt visueel beoordeeld of de meetpaal zich midden tussen de onderste geleiders van beide circuits bevindt. Ook de pylonen van masten 42, 43, 44 en 45 worden gebruikt om te beoordelen of de zichtlijn over de kop van de centrale meetpaal midden tussen die pylonen doorloopt. Op deze manier kan de onnauwkeurigheid in de positiebepaling van de centrale meetpaal tot ongeveer 0,5 m worden teruggebracht. In de richting van de lijn is enkele meters onnauwkeurigheid niet zo belangrijk, maar loodrecht op de lijn wel.

Om de overige posities te bepalen wordt de lijn door de centrale paal en loodrecht op de hoogspanningslijn uitgezet. Dit gebeurt door de meest zuidelijke meetpaal zo te plaatsen dat de zichtlijn door deze en de centrale paal loodrecht op de geleiders van de hoogspanningslijn staat. Op deze meetlocatie kan dit vrij nauwkeurig omdat de beoogde lijn precies langs de zijkant van een van de schuren aan de Munnikenweg valt (zie de topografische kaart, Figuur 2a). Uitgaande van deze meest zuidelijk meetpaal wordt vervolgens de meest noordelijke paal zo geplaatst dat die precies op een lijn ligt met de centrale en de meest zuidelijke meetpaal. Op deze manier zijn de centrale meetpaal en de lijn waarlangs gemeten wordt vastgelegd. Tot slot moeten de overige meetpalen op de juiste afstand gebracht worden. Dit gebeurt door een meetlint uit te leggen en op de vooraf vastgesteld afstanden de meetpalen met behulp van een grondboor in de grond te plaatsen. Daarbij wordt visueel gecontroleerd of alle palen op een rechte lijn liggen. De boordiepte wordt zo gekozen dat de meters, na bevestiging aan de meetpaal, zich op 1 m boven het maaiveld bevinden. Hoewel het maaiveld op de meetlocatie vrijwel vlak is, blijven afwijkingen in de orde van tientallen centimeters van het horizontale vlak mogelijk.

In principe zijn de meetpalen in zuidelijke en noordelijke richting geplaatst op 0 m, 20 m, 30 m, 40 m en 50 m. Echter, meetpaal 1 kon in zuidelijke richting niet op 50 m afstand worden gezet omdat dat punt midden in een sloot ligt. Deze meetpaal is zo dicht mogelijk bij de slootkant geplaatst, op een plek waar het weiland nog niet afloopt naar de sloot. Als gevolg hiervan is de afstand naar de centrale paal niet 50 m maar 46 m. In noordelijke richting waren de vooraf gekozen afstanden wel beschikbaar. Echter, hier deden zich problemen voor met de meest noordelijke meetpalen/posities (8 en 9). Deze beoogde meetposities liggen aan de overkant van een sloot op het talud van de N470. Dit talud ligt

naar schatting 60-70 cm hoger dan het maaiveld in het weiland. Bij gebruik van de meetpalen zouden de meters zich hoger bevinden dan in de posities 1 tot en met 7. Om dit te voorkomen zijn de meters in positie 8 en 9 niet op palen gezet, maar direct op de grond geplaatst. Dat betekent wel dat hier de meters ongeveer 30 cm te laag liggen, maar dat is beter dan 70 cm te hoog.

Tijdens de meetperiode is de onderlinge afstand van de meetpalen/posities met behulp van een laserafstandmeter (Bosch PLR 25, S/N 205516559) gecontroleerd. De onderlinge afstand tussen de meetpalen (of de op de grond geplaatste meters) is steeds drie keer bepaald. Het gemiddelde van die metingen wordt gebruikt als de beste schatting voor de afstand. Vervolgens zijn deze onderlinge afstanden gebruikt om de afstand van de meters tot het hart van de hoogspanningslijn te bepalen, ervan uitgaande dat de centrale paal in het hart van de lijn staat. Dit leverde kleine correcties op (maximaal 0,1 m) ten opzichte van de met het meetlint uitgezette afstanden (zie Tabel 1). Deze afstanden zijn ook in Figuur 2b weergegeven.

Tabel 1. De van te voren beoogde posities van de meters en de uiteindelijk in het veld gerealiseerde posities

meetpaal	meter nr.	beoogde positie	werkelijke positie
"9"	50	50 m N	-50,0 m N
"8"	49	40 m N	-39,9 m N
7	13	30 m N	-30,0 m N
6	12	20 m N	-20,1 m N
5	11	0 m (op de hartlijn)	0,0 m
4	10	20 m Z	20,0 m Z
3	08	30 m Z	30,0 m Z
2	07	40 m Z	40,0 m Z
1	06	50 m Z, bijgesteld tot 46 m Z i.v.m. sloot	46,0 m Z

*) meters nr. 49 en 50 bevinden zich op het talud van de N470, andere meters op 1 m boven het maaiveld

Meetperiode

De nulmeting is uitgevoerd vanaf 12 uur op 17 december 2012 tot 12 uur op 18 december 2012. De temperatuur tijdens de metingen was circa 6 °C (etmaal gemiddelde Schiphol: 17 december 2012: 6,1 °C; 18 december 2012: 5,3 °C). In december 2012 stond er nog geen spanning op de verbinding Wateringen-Bleiswijk. Na afloop van de nulmeting is op elke locatie van de meetpalen een plastic fles ingegraven zodat de palen en de meters bij de meting na ingebruikname van de hoogspanningslijn op dezelfde plek geplaatst kunnen worden.

Na ingebruikname van de hoogspanningslijn zijn de metingen uitgevoerd vanaf 11 uur op 2 oktober 2013 tot 11 uur op 3 oktober 2013. De temperatuur tijdens de metingen was circa 12 °C (etmaal gemiddelde Schiphol: 2 oktober 2013: 10,7 °C; 3 oktober 2013: 12,7 °C). Alle negen ingegraven flessen werden teruggevonden waardoor het mogelijk was om de meters op dezelfde positie te plaatsen als tijdens de nulmeting.

3.2 Magneetveldmetingen

EMDEX Lite

Voor de metingen zijn EMDEX Lite-meters gebruikt (fabrikant en leverancier Enertech Consultants, California, USA; zie Figuur 3; voor specificaties zie http://www.enertech.net/html/EMDEXLiteSpecs.html). Voor het uitlezen van de meters en het opslaan van de meetgegevens op een computer is het softwarepakket EMCALC2013 (leverancier Enertech Consultants, California, USA) gebruikt.



Figuur 3. De EMDEX Lite magneetveldmeter

Deze meters meten de effectieve (RMS) waarde van het magneetveld in het frequentiegebied van 40 tot 1000 Hz. De metingen worden in het apparaat opgeslagen. Ook de tijd wordt opgeslagen vanaf het moment van aanzetten van de meter. Na afloop van de gehele meetserie worden de meters uitgelezen en naar Microsoft Excel getransporteerd; het tijdstip van de uitlezing bepaalt hierbij het tijdstip waarop de meting wordt beëindigd; alle meetmomenten worden teruggerekend vanaf dit tijdstip. Tijdens de meetperiode meten de meters elke 4 seconden. De kleinste waarde (ongelijk aan nul) in het schaalbereik van de meters is 0,01 microtesla. Dat betekent dat de kleinste waarde die kan worden gemeten (detectiegrens) 0,005 microtesla bedraagt. De meetonnauwkeurigheid van de meters is volgens de specificaties ±2-4%. Vanwege de relatief lage veldsterkten ten opzichte van het meetbereik en de breedbandige meetmethode (niet frequentiespecifiek) is uitgegaan van ±4% onnauwkeurigheid in het gemeten magneetveld.

Om de invloed van eventuele hoogfrequente signalen te elimineren en de meters te beschermen, zijn ze in een speciaal daarvoor door de fabrikant aangeleverde pouch verpakt. Om de meters droog te houden is deze pouch in een waterdichte box gestoken. De waterdichte box wordt in een plastic zak verpakt en aan een haak in de meetpaal bevestigd en met tape gefixeerd. Als extra bescherming tegen zon en regen wordt er tot slot een kunststof terrastegel boven op de paal bevestigd. Dit levert de situatie van Figuur 4 op.



Figuur 4. Verpakking, bevestiging en bescherming van de magneetveldmeters tijdens de veldmeting (toelichting zie tekst)

Na plaatsen van de meetpalen en ophangen van de meters ziet de meetlocatie eruit als in Figuur 5 op de volgende bladzijde.

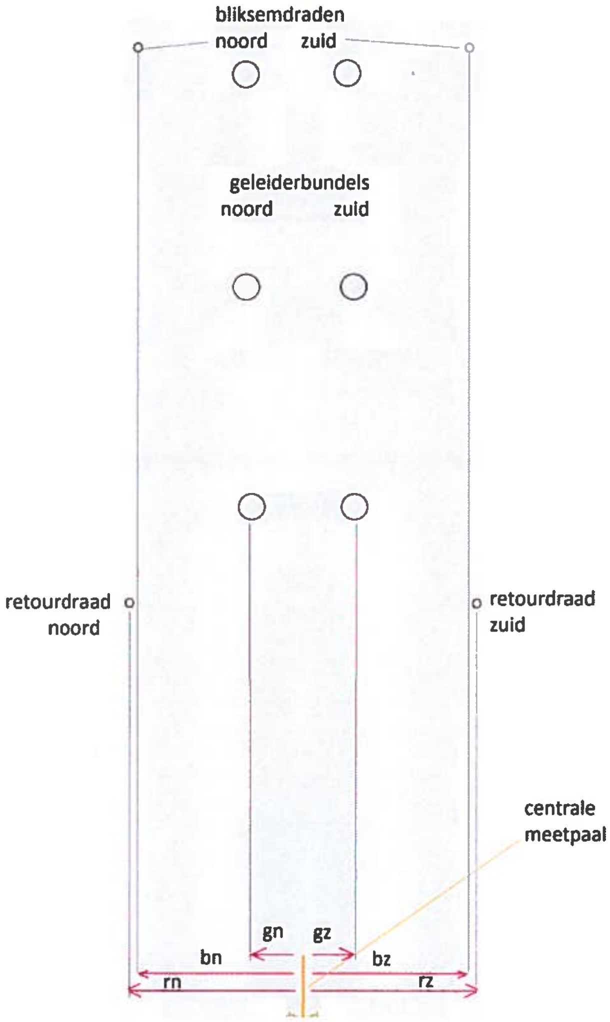
Nadat de meetopstelling volledig was geïnstalleerd, zijn er controles uitgevoerd van de afstanden tussen de geplaatste meetpalen, de positie van de centrale meetpaal en de doorhang van de geleiders.

Positie centrale meetpaal
Met behulp van de geleiderbundels, de bliksemdraden en de compensatiedraden is een controle op de positie van de centrale paal uitgevoerd. Hierbij is geprobeerd door langs de draden van de hoogspanningslijn te kijken de plek recht onder de geleiders, recht onder de bliksemdraden en recht onder de compensatiedraden te bepalen. Deze plek is gemarkeerd en de afstand tussen de markering en de centrale meetpaal is bepaald, zowel in noordelijke als in zuidelijke richting (zie Figuur 6). Als de meetpaal centraal staat, zijn de gemeten afstanden in noordelijke en zuidelijke richting precies gelijk. Als de gemeten afstanden verschillen, staat de centrale meetpaal niet precies in het midden. Het verschil geeft dan aan hoever de centrale meetpaal uit de hartlijn staat.



Figuur 5. De opstelling van de meetpalen in het veld tijdens de nulmeting; de foto is genomen kijkend naar het noorden; op de voorgrond staat meetpaal nr. 1 (zie Figuur 2)

In de praktijk heeft deze aanpak beperkingen. De belangrijkste is dat het moeilijk is om visueel de positie recht onder de geleiders, bliksemdraden of compensatiedraden nauwkeurig te bepalen. Bij de geleiders zou het relatief eenvoudig moeten zijn omdat de vierbundel een goede kans biedt om visueel de positie er recht onder te bepalen. Aan de zuidkant lukt dit, maar aan de noordzijde niet omdat de geleiderbundel ten opzichte van het horizontale vlak gedraaid is. Voor bliksemdraden en compensatiedraden is de positiebepaling onnauwkeuriger. In principe zou de verschilbepaling op basis van geleiders, bliksemdraden en compensatiedraden tot hetzelfde verschil in positie moeten leiden. In de praktijk is dat niet zo, het verschil varieert tussen 0,13 m (geleiders) en 0,82 m (bliksemdraden). Het (ongewogen) gemiddelde van alle bepalingen wijst erop dat de centrale paal mogelijk 0,2 m te ver naar het noorden staat. Omdat deze verschilbepaling niet erg betrouwbaar is worden de posities van de meetpalen niet gecorrigeerd. De 0,2 m kan worden gezien als een schatting van de onnauwkeurigheid in de positie van de meter aan de centrale meetpaal en daarmee ook voor de onnauwkeurigheid in de positie van de andere meters.



Figuur 6. Illustratie bij de methode om de positie van de centrale meetpaal te controleren (zie tekst voor de uitleg)

Doorhang geleiders
De hoogte van de geleiderbundels boven het maaiveld is een belangrijke parameter in de modelberekening voor het magneetveld. Daarom is de hoogte van de laagste geleiders met de laserafstandsmeter bepaald. Gemiddeld hangen de onderste twee geleiders van de onderste geleiderbundels zowel van circuit zwart als van circuit wit op de meetlocatie en op het moment van meten (tussen 17:00 en 18:00 uur op 17 december 2012) op 18,0 m boven het maaiveld. Dit komt redelijk overeen met de hoogte volgens opgave van TenneT: circuit zwart 17,9 m en circuit wit 17,8 m, die in de modelberekening is gebruikt.

3.3 Stroommetingen

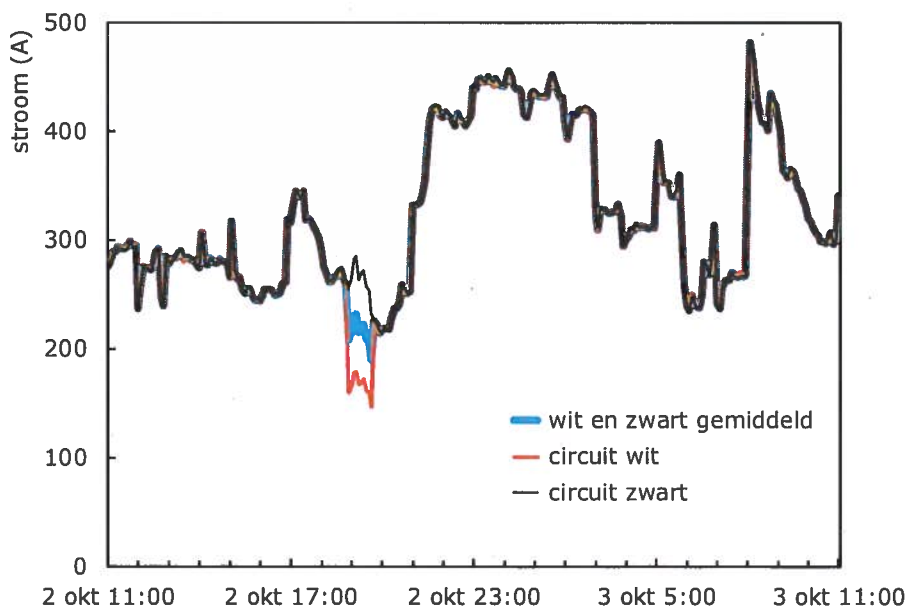
TenneT meet de stromen door de 380 kV-lijn Wateringen-Bleiswijk in station Wateringen en in station Bleiswijk. De door TenneT gebruikte meetprocedure is beschreven in het rapport over het validatieonderzoek in Maartensdijk [5]. TenneT bepaalt elke 5 minuten op de stations Wateringen en Bleiswijk de volgende gegevens: datum, tijd, *P* (het werkelijke of actieve vermogen, eenheid MW), *Q* (het blindvermogen of reactieve vermogen, eenheid MVAr) en de

spanning *U*. Deze grootheden worden apart voor circuit wit en circuit zwart bepaald. Voor de modellering van het magneetveld is alleen de stroom door circuit zwart en circuit wit op de meetlocatie van belang. Deze stroom (I in ampère) wordt uit *U* (in volt), *P* (in watt) en *Q* (in volt ampère reactief) berekend volgens:

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{U\sqrt{3}}$$

De stromen berekend uit de gegevens in station Wateringen verschillen van die berekend uit de gegevens in station Bleiswijk. Voor het zwarte circuit bijvoorbeeld wordt – gemiddeld over de 24 uur van de meting – in Wateringen een stroom van 230 A gemeten en in Bleiswijk een stroom van 327 A. De verklaring hiervoor kan liggen in het blindvermogen (laadstroom) van de lijn zelf. Vooral bij lage belasting van de lijn speelt deze laadstroom een rol van betekenis. Omdat de meetlocatie dichter bij station Bleiswijk ligt, zal de daar gemeten stroom meer op de werkelijke stroom op de meetlocatie lijken. Er is nog een tweede reden voor de verschillen tussen station Wateringen en station Bleiswijk. Een gedeelte van de verbinding Wateringen-Bleiswijk tussen station Wateringen en de meetlocatie bestaat uit ondergrondse kabel. Zo'n kabel gedraagt zich anders dan een bovengrondse lijn en zorgt voor meer laadstroom. De stroom op de meetlocatie zal vanwege deze effecten beter overeenkomen met de stroom gemeten in station Bleiswijk dan met de stroom gemeten in station Wateringen. Daarom is ervoor gekozen om de stroom bepaald uit de gegevens gemeten in station Bleiswijk als uitgangspunt te nemen voor de stroom op de meetlocatie.

De stromen door circuit wit en circuit zwart verschillen over de 24 uur van de meting minder dan 1%, met uitzondering van de periode van 18:55 uur tot en met 19:40 uur op 2 oktober 2013 (zie Figuur 7).



Figuur 7. Door TenneT op station Bleiswijk gemeten stroom voor circuit zwart en circuit wit en de gemiddelde stroom

Modelberekeningen volgens de Handreiking gaan ervan uit dat de stromen door circuit zwart en circuit wit gelijk zijn. Voor de modelberekeningen is daarom de gemiddelde stroom door beide circuits gebruikt. Dit is een goede benadering voor de gehele meetperiode, met uitzondering van het gedeelte tussen 18:55 uur en 19:40 uur op 2 oktober 2013. In deze drie kwartier kunnen de modelberekeningen voor de magneetveldsterkte, die uitgaan van gelijke stroom door de circuits, niet worden vergeleken met de gemeten magneetveldsterkten die een verschil in stroom door de circuits wel mee meten. Daarom zijn bij de verdere analyse de metingen op 2 oktober tussen 18:50 uur en 19:45 uur niet meegenomen. Hierdoor blijven er in de meetperiode 278 stroommetingen over. De gemiddelde stroom over de meetperiode bedraagt 328,9 A.

De nauwkeurigheid van de stroommeting wordt bepaald door de meetmethode en de op station Bleiswijk geïnstalleerde stroomtransformatoren, spanningstransformatoren en meetomvormers. Een uitgebreide beschrijving is gegeven in Bijlage 3. De gegevens in Bijlage 3 leiden voor een gemiddelde stroom van 328,9 A tot een absolute onnauwkeurigheid van 32,1 A, ongeveer 9,7%. Deze schatting wordt gehanteerd voor de stroom gedurende de gehele meetperiode.

4 Resultaten

4.1 Meetresultaten nulmeting

Beschrijving
De resultaten van de nulmeting zijn weergegeven in Figuur 8 en Figuur 9. Bij de analyse zijn alle 4 seconden metingen gebruikt, maar voor de duidelijkheid zijn in de figuren niet alle metingen weergegeven. Voor elke vijf minuten gedurende de meetperiode, te beginnen bij 12 uur op 17 december, is een meting weergegeven. Alle negen meters hebben gedurende de gehele meetperiode gemeten. Meer dan 80% van de metingen is gelijk aan nul. Daarnaast komen waarden van 0,01 microtesla regelmatig voor. In een enkel geval wordt door de meters op 46 m en 40 m ten zuiden van de lijn een waarde van 0,02 microtesla gemeten. Gemiddeld over de meetperiode en over alle meters bedraagt de gemeten magneetveldsterkte 0,002 microtesla. Deze meetwaarden liggen beneden de detectiegrens (0,005 microtesla) van de magneetveldmeters.

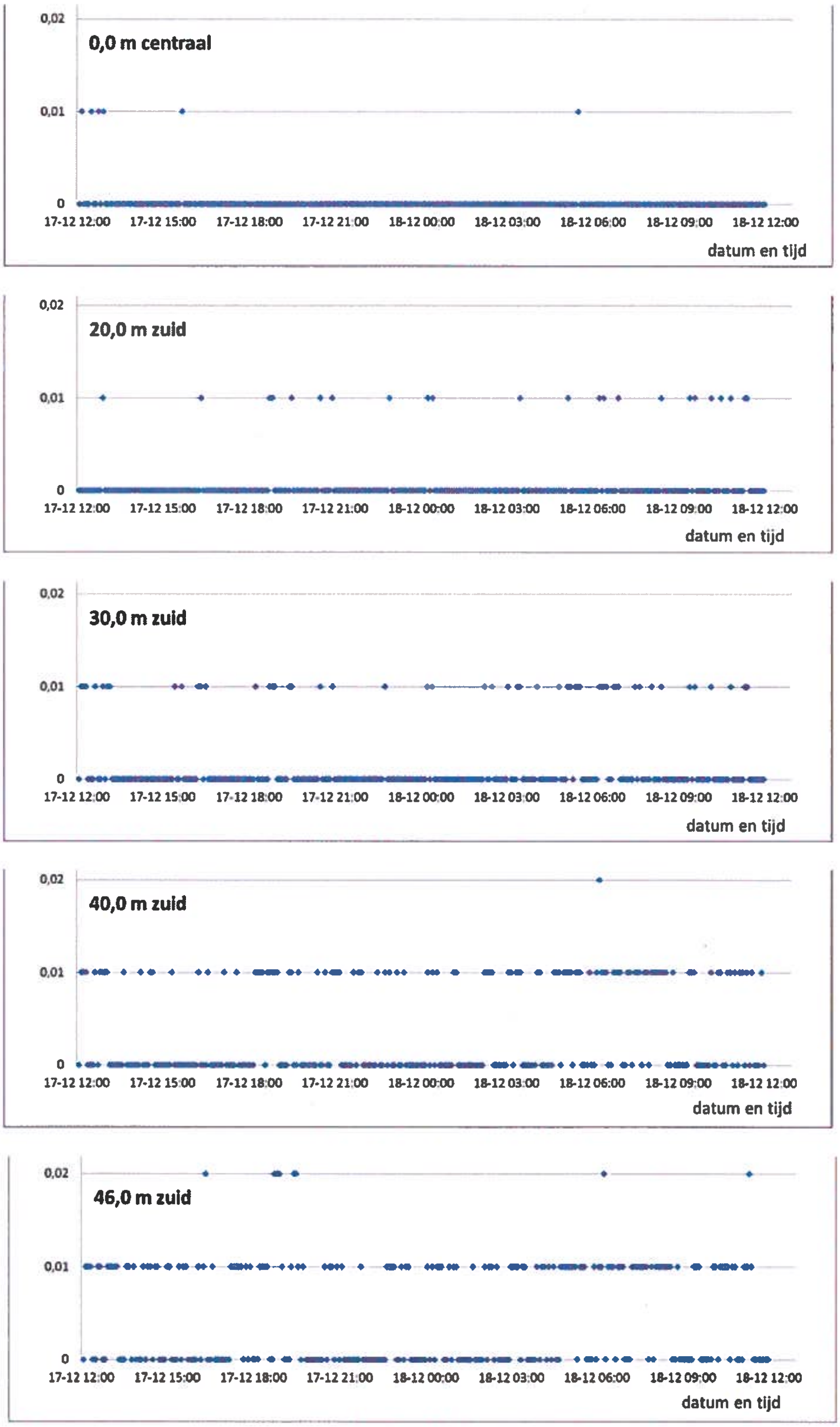
Conclusie
Gemiddeld over de 24 uur van de nulmeting verschilt het 50 Hz-magneetveld op geen enkele positie van nul. Dat betekent dat er op de meetlocatie behalve de bovengrondse hoogspanningslijn geen andere 50 Hz-magneetveldbronnen aanwezig (of in werking) zijn. Hiermee is de eerste vraag uit paragraaf 1.2: 'Wat zijn de heersende magneetvelden voordat er stroom door de nieuwe hoogspanningslijn loopt?' beantwoord.

De meting van het magneetveld na ingebruikname van de hoogspanningslijn langs Rokkeveen geeft daarom zuiver en alleen het magneetveld van die lijn.

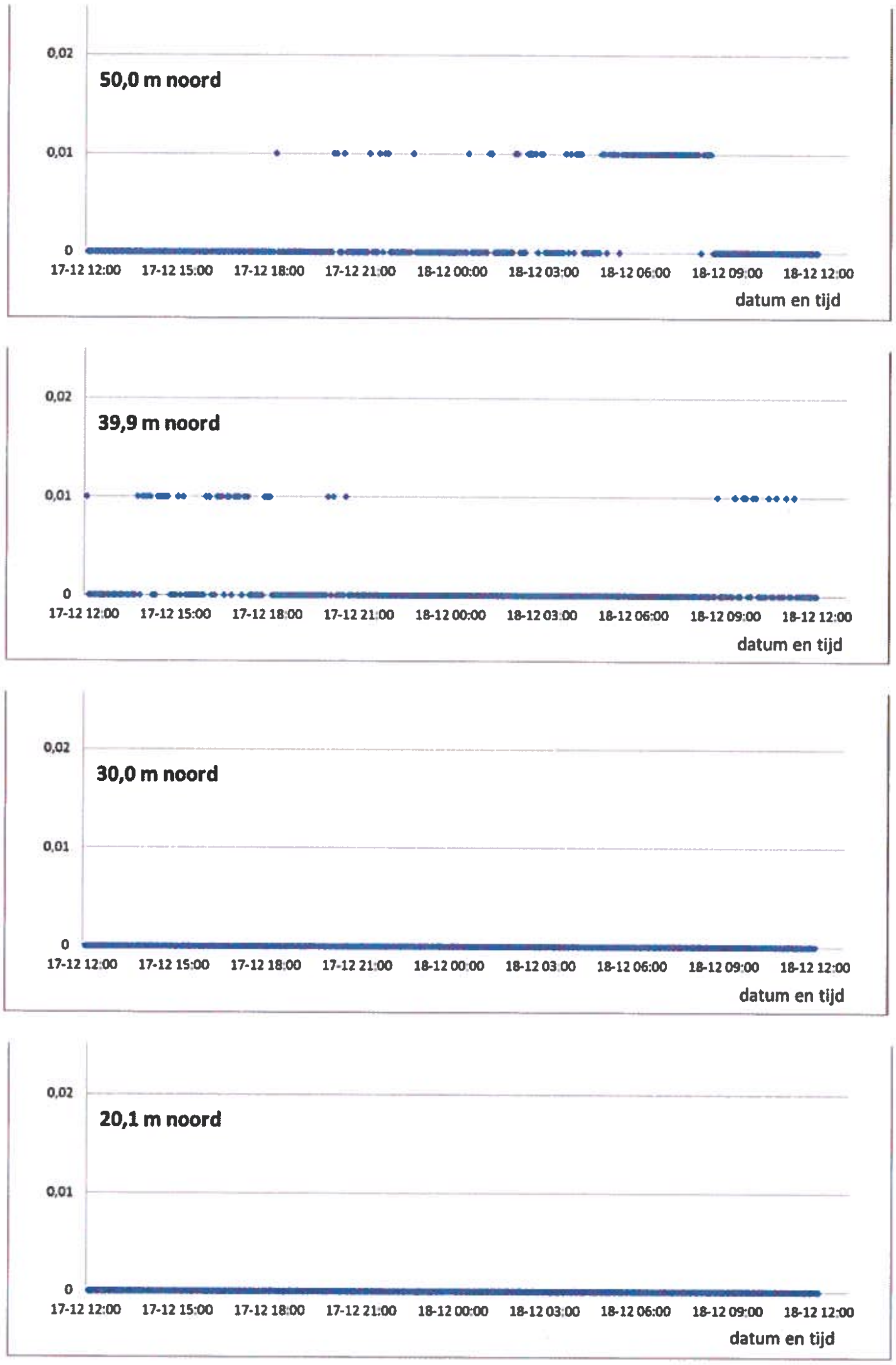
4.2 Meetresultaten na ingebruikname

De magneetveldmeters hebben geen absolute tijdregistratie. Omdat het magneetveld en de stroom (op fysische gronden) het zelfde tijdgedrag hebben, mogen de magneetveldmeters gesynchroniseerd worden met de stroom. Eerst wordt de centrale meter (nr. 11) gesynchroniseerd met de stroom. Dit gebeurt door de resultaten van de magneetveldmeting steeds 4 seconden op te schuiven en te beoordelen wanneer de vorm van de verschoven magneetveldmeting het best overeenkomt met de vorm van de stroommeting. Dat gebeurt door de correlatiecoëfficiënt te berekenen en te kijken voor welke verschuiving deze maximaal is. Vervolgens worden de andere meters op basis van hun volledige tijdreeks eerst onderling gesynchroniseerd en tot slot gesynchroniseerd met meter nr. 11. Dit levert de in Figuur 10 weergegeven gemeten magneetveldsterktes.

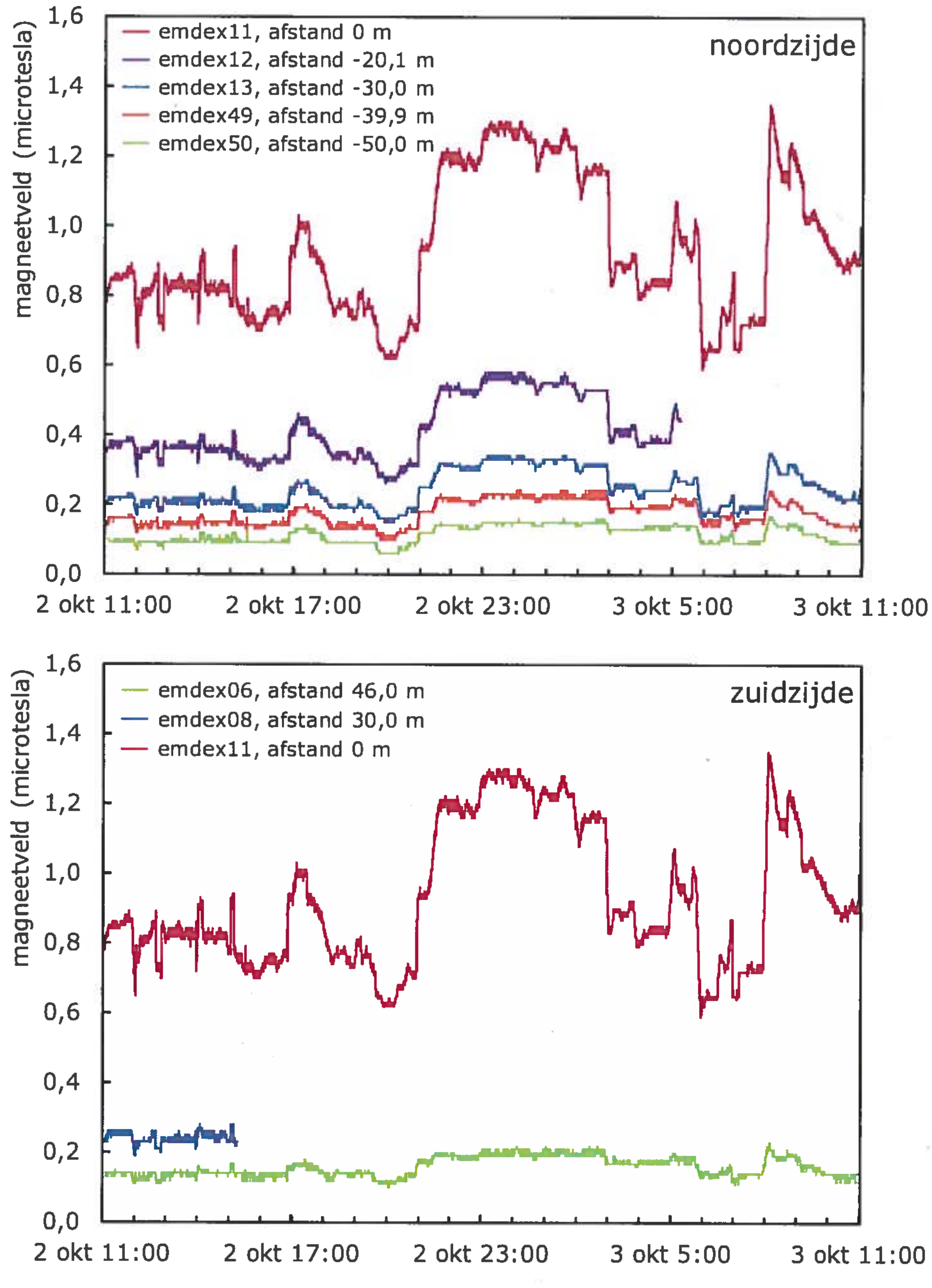
Uit Figuur 10 blijkt dat niet alle negen meters gedurende de gehele meetperiode van 24 uur goed hebben gefunctioneerd. Een meter (nr. 12) heeft gedurende 76% van de meetperiode gemeten en een meter (nr. 08) gedurende 18%. Twee meters hebben in het geheel niet gemeten. Dat is geheel onverwacht, tijdens eerdere veldmetingen is er geen uitval opgetreden. Dit betekent dat er aan de noordzijde een vrijwel volledige set metingen beschikbaar is. Aan de zuidzijde heeft alleen meter nr. 06 op 46 m uit het hart van de lijn een volledige dataset.



Figuur 8. Resultaten voor de nulmeting van de meters aan de zuidzijde van de lijn: de sterkte van het magneetveld in microtesla



Figuur 9. Resultaten voor de nulmeting van de meters aan de noordzijde van de lijn: de sterkte van het magneetveld in microtesla



Figuur 10. Registratie van de magneetveldsterkte door de (gesynchroniseerde) meters

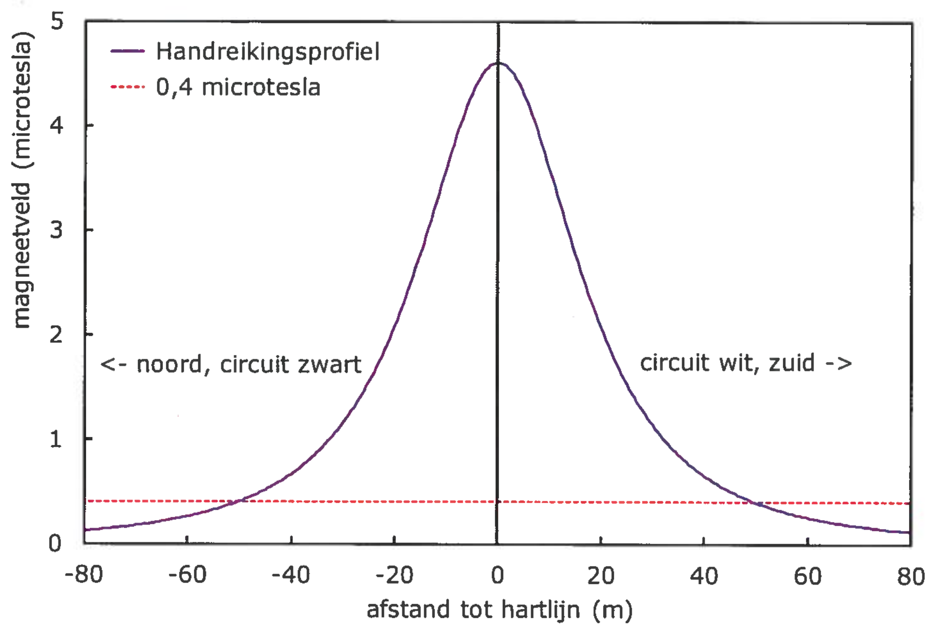
De andere drie meters aan de zuidzijde hebben geen of te weinig metingen geregistreerd om in de analyse te kunnen worden opgenomen. Voor het vergelijken van de gemodelleerde magneetveldsterktes met de gemeten magneetveldsterktes en het vergelijken van gemiddelden, standaarddeviaties enzovoort is het wenselijk dat de metingen zich over dezelfde periode uitstrekken. Meter 12 heeft gedurende driekwart van de meetperiode gemeten. Inkorten van de meetperiode van de andere vijf meters tot dezelfde driekwart van de meetperiode betekent dat voor vijf meters de metingen gedurende een kwart van de meetperiode niet gebruikt worden. Dat is een groter verlies aan

meetpunten dan wanneer de resultaten van meter 12 worden weggelaten. Daarom is deze meter niet meegenomen bij de definitieve analyse. Wel is voor meter 12, en ook voor meter 08, op de niet-volledige meetperiode een voorlopige analyse gemaakt. De resultaten van deze analyse geven geen wezenlijk ander beeld. Dit betekent dat de vergelijking tussen gemodelleerd en gemeten magneetveld op vijf meetposities is uitgevoerd: in het centrale punt (0 m), 3 meetpunten ten noorden van de lijn (-30 m, -40 m, -50 m) en één ten zuiden van de lijn (46 m). Op 278 tijdstippen zijn er voor elk van de vijf meters metingen beschikbaar, in totaal dus 1390 metingen. Dit aantal is voldoende om een goede vergelijking tussen gemodelleerd en gemeten magneetveld te kunnen maken.

Om een verklaring voor het uitvallen van de meters te vinden zijn de negen meters die in Rokkeveen zijn gebruikt aan een nader onderzoek onderworpen. Allereerst is onderzocht of de meters misschien gewoon kapot waren of dat de batterijspanning te laag was. Alle meters, ook de meters die in Rokkeveen zijn uitgevallen, bleken met de in Rokkeveen gebruikte batterijen gedurende een periode van 8 uur op het RIVM goed te meten. Er is dus niets structureel mis met de meters of de batterijen. Vervolgens is onderzocht of het mogelijk is dat de lage minimumtemperatuur (6 °C) in de nacht van 2 op 3 oktober 2013 tot een te lage batterijspanning heeft geleid. De negen meters zijn daarvoor in de waterdichte boxen in de koelkast (4 °C) geplaatst. Na 15 uur bleken alle negen meters nog correct te meten. Ook de batterijspanning in combinatie met lage temperatuur vormt geen verklaring voor het uitvallen van de meters. Bovendien zou die niet kunnen verklaren waarom vier meters al voor het vallen van de avond zijn uitgevallen. De enige observatie tijdens de controlemeting is dat meter nr. 06 één keer is uitgegaan bij een meting van de batterijspanning en dat meter nr. 07 tijdens het verplaatsen één keer in de 'help'-modus is geschoten. Dat kan wijzen op een slecht contact in het apparaat of een slecht contact tussen de aansluitclip van het apparaat en de polen van de batterij. Zo'n slecht contact kan tijdens het transport in de auto of tijdens het bevestigen van de meters aan de meetpaal zijn losgegaan en tot uitval van meters hebben geleid. Omdat het uitleesvenster van de meters, verpakt in pouch, box en plastic zak niet zichtbaar is, kan dit niet tijdens het installeren van de meetopstelling worden ontdekt. Voor de meters, die na installatie, transport en bevestigen eerst nog uren hebben gemeten, is dat geen verklaring. Bovendien hebben alle meters tijdens de nulmeting wel foutloos gemeten, terwijl de meters op dezelfde manier zijn getransporteerd en bevestigd.

Feitelijk heeft dit nader onderzoek geen sluitende verklaring voor het uitvallen van de magneetveldmeters opgeleverd.

4.3 Resultaten modelberekeningen



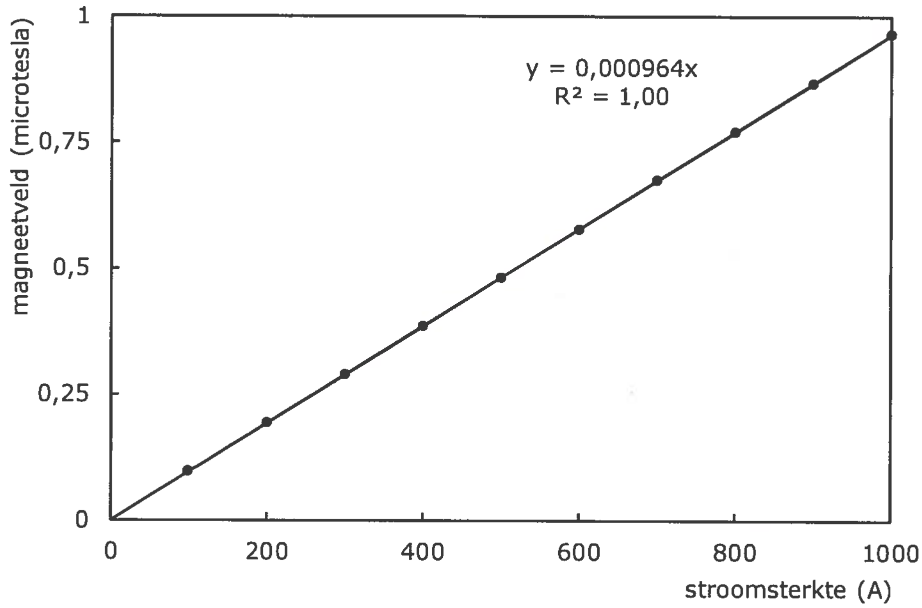
Figuur 11. Handreikingsprofiel: de sterkte van het magneetveld voor afstanden tussen 0 en 80 m uit het hart van de hoogspanningslijn bij een rekenstroom van 30% van de ontwerpbelasting (1200 A)

Het in Figuur 11 geschetste profiel is berekend volgens de Handreiking. Daarbij is rekening gehouden met twee circuits van elk drie geleiderbundels, waarbij door elk circuit een stroom loopt van 1200 A, 30% van de ontwerpbelasting voor de verbinding Wateringen-Bleiswijk. Bliksemdraden en compensatiedraden worden niet meegenomen en er wordt geen rekening gehouden met eventuele stromen door de masten naar aarde. Uit het profiel is de breedte van de 0,4 microtesla-zone bepaald. Deze bedraagt 50,5 meter aan de noordzijde en 49,9 m aan de zuidzijde.

De stroom door de lijn varieert tijdens de meetperiode. Om meting en model te kunnen vergelijken is op elke meetpositie en op elke tijdstip het gemodelleerde magneetveld nodig. Dat gemodelleerde magneetveld is bepaald met de in paragraaf 2.1 geschetste methode.

Figuur 12 geeft als voorbeeld het verband tussen het gemodelleerde magneetveld en de stroom voor de meetpositie 30 m ten noorden van de hoogspanningslijn.

Op elke positie is dit verband tussen het gemodelleerde magneetveld en de stroom lineair, het magneetveld is evenredig met de stroom. Met behulp van dit verband is uit de gemeten stroom (Figuur 7) op elke meetpositie en op elk tijdstip het gemodelleerde magneetveld bepaald.



Figuur 12. Verband tussen de modelberekening voor het magneetveld en de stroom op de positie van meter nr. 13 (30 m ten noorden van de hoogspanningslijn)

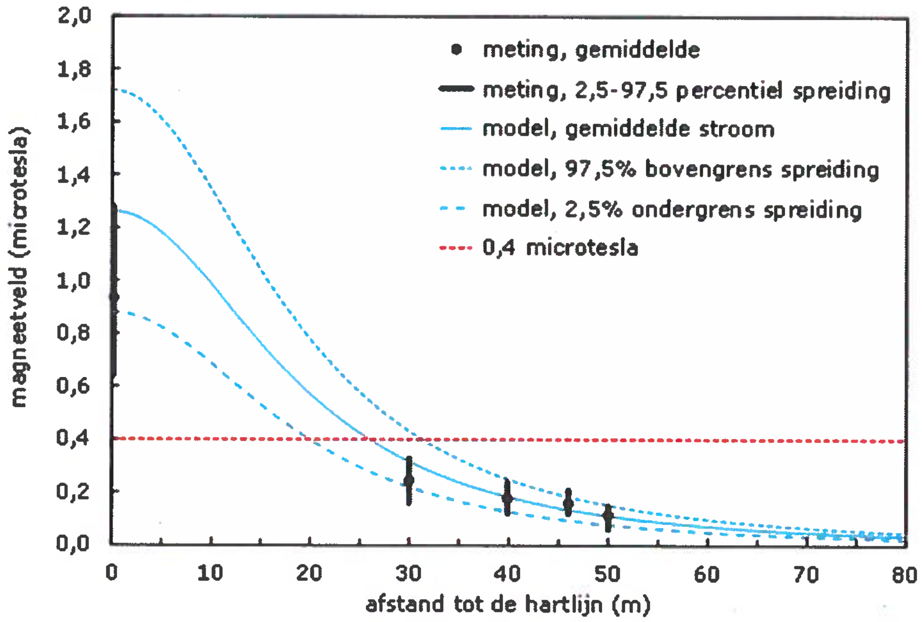
4.4 Vergelijking gemodelleerde en gemeten magneetvelden

Om de tweede vraag uit paragraaf 1.2 naar het verschil tussen gemodelleerd en gemeten magneetveld te kunnen beantwoorden is een vergelijking tussen model en meting gemaakt. Ook is de theoretische onzekerheidsmarge (Bijlage 2) bepaald. Deze analyse wordt gebruikt om te contoleren of de resultaten van het validatieonderzoek in Maartensdijk ook gelden voor de hoogspanningslijn in Rokkeveen waarvoor andere masten (Wintrack) zijn gebruikt en die een ander spanningsniveau heeft.

In Figuur 13 zijn de gemodelleerde magneetvelden en de gemeten magneetvelden op de verschillende afstanden naast elkaar gezet. Hierbij zijn de meetlocaties aan beide zijden van de hoogspanningslijn, op basis van de afstand tot de hartlijn, weergegeven. Omdat binnen de meetperiode de stroomsterkte varieert, variëren ook de gemodelleerde en gemeten veldsterktes. Op elke afstand en op elk tijdstip gedurende de meetperiode is het gemodelleerde magneetveld bepaald. Van deze tijdreeks met gemodelleerde waarden is op elke afstand het tijdgemiddelde magneetveld bepaald. De blauwe getrokken lijn geeft dat gemiddelde magneetveld op elke positie aan de noordkant van de hoogspanningslijn weer. Verder is het gebied bepaald waarbinnen 95% van de gemodelleerde magneetveldsterktes liggen. Dat gebied wordt omsloten door het 97,5-percentiel[2] (blauwe stippellijn) en het 2,5-percentiel (blauwe streepjeslijn). In Figuur 13 zijn ook de metingen opgenomen. Hierbij zijn alle gemeten 5-minutenwaarden op een meetpositie gemiddeld over de meetperiode. Dit gemiddelde gemeten magneetveld op 0 m, 30 m, 40 m, 46 m en 50 m uit het hart van de lijn is met bolletjes (•) weergegeven. Ook hier zijn de 97,5- en 2,5-percentielwaarden bepaald. De verticale lijn door elk bolletje geeft het

[2] Het 97,5-percentiel is het getal waarvoor geldt dat 97,5% van de magneetveldsterktes lager of eraan gelijk is. Voor het 2,5-percentiel geldt dat 2,5% van de magneetveldsterktes lager of eraan gelijk is.

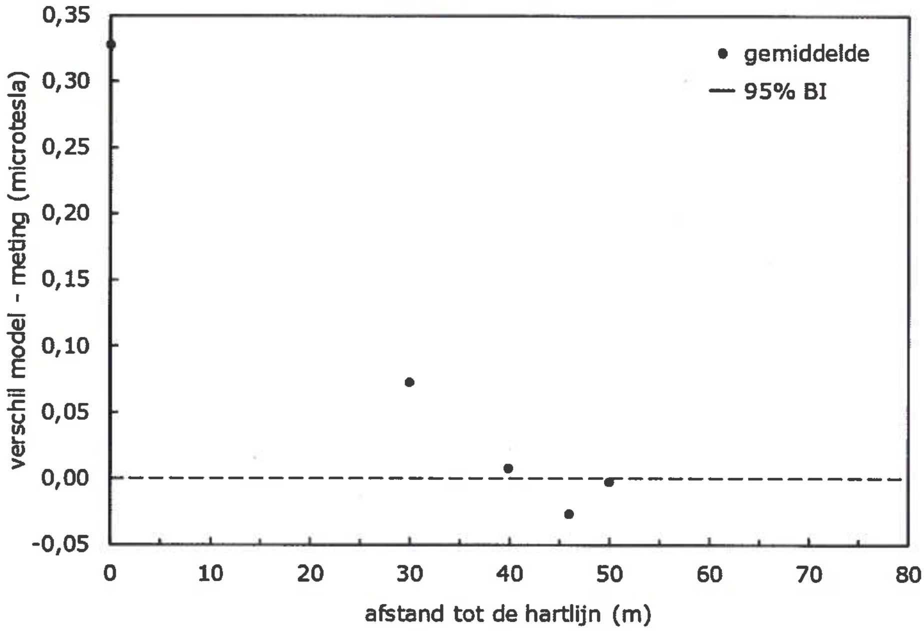
gebied tussen 2,5- en 97,5-percentielwaarden voor de meting op die positie weer.



Figuur 13. Vergelijking tussen gemeten en gemodelleerde sterkte van het magneetveld over de meetperiode

Figuur 13 laat zien dat alle meetpunten tussen de blauwe streepjes en stippellijn liggen. Voor de meetpunten geldt dat het bereik tussen de 2,5- en 97,5-percentielwaarden rond de meetwaarde overlapt met het berekende profiel (blauwe getrokken lijn). Dit beeld is in overeenstemming met het validatieonderzoek in Maartensdijk. Net als voor Maartensdijk geeft Figuur 13 een indicatie dat model en meting overeenkomen.

De volledige analyse van het verschil tussen gemodelleerd en gemeten magneetveld, inclusief de onzekerheidsanalyse, is opgenomen in Bijlage 2. Figuur 14 laat het verschil zien tussen het gemodelleerde en het gemeten magneetveld op de vijf meetposities.



Figuur 14. Verschil tussen gemodelleerd en gemeten magneetveld. Het 95%-betrouwbaarheidsinterval is niet zichtbaar, omdat het binnen de bolletjes van de meetpunten ligt

De resultaten bevestigen het beeld uit het validatieonderzoek in Maartensdijk. Voor grotere afstanden tot de hoogspanningslijn komen de gemodelleerde en gemeten magneetveldsterktes voldoende overeen. Vanaf 40 m is het verschil tussen model en meting minder dan 0,03 microtesla. Dichter bij de lijn is de overeenstemming minder goed.

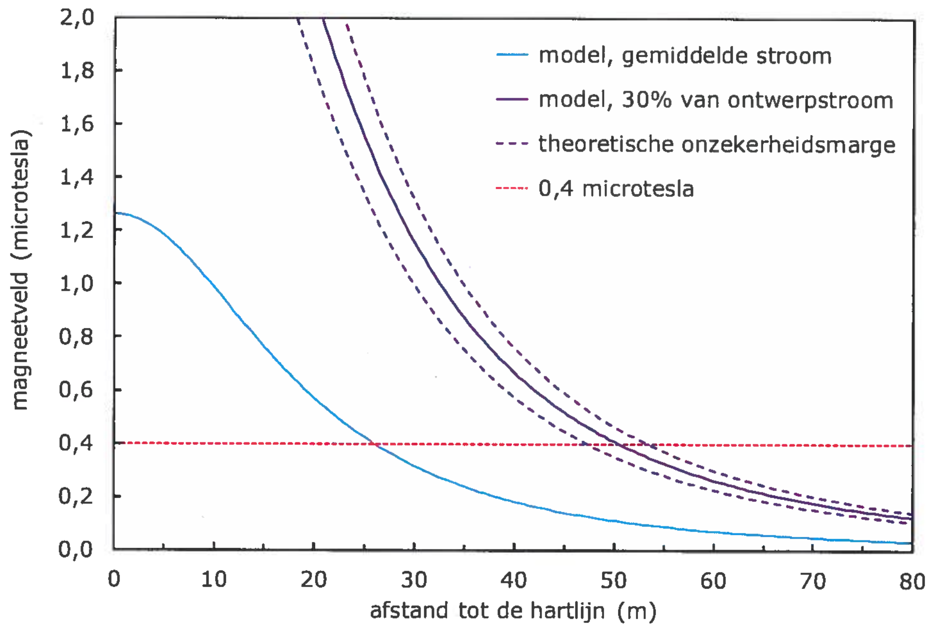
In Bijlage 2 worden behalve de absolute verschillen tussen gemodelleerde en gemeten magneetveldsterkte ook de relatieve verschillen bekeken. Deze relatieve verschillen tussen gemodelleerde en gemeten magneetveldsterkte kunnen worden vergeleken met de theoretische onzekerheidsmarge. Deze theoretische onzekerheidsmarge wordt bepaald door de eigenschappen van de magneetveldmeters, de methode voor het meten van de stroom en door de onzekerheden in de modelberekening. De resultaten van deze vergelijking zijn weergegeven in Bijlage 2, Figuur 17. Ook hier wordt het beeld uit het validatieonderzoek in Maartensdijk bevestigd. Vanaf 40 m uit het hart van de hoogspanningslijn ligt het verschil tussen model en meting binnen de theoretisch verwachte onzekerheidsmarge van 23,1%. Dichter bij de lijn ligt de gemodelleerde waarde van de magneetveldsterkte boven de gemeten waarde en is het verschil tussen model en meting groter dan op grond van de theoretische onzekerheidsmarge kan worden verwacht.

4.5 Gevolgen verschillen tussen model en meting voor de magneetveldzone

Tot slot rest de laatste vraag uit paragraaf 1.2: *Wat betekenen de verschillen tussen metingen en modellen voor de magneetveldsterkte buiten de magneetveldzone berekend volgens de handreiking?*
Om een uitspraak te kunnen doen over de magneetveldzone berekend volgens de Handreiking is uitgegaan van het Handreikingsprofiel in Figuur 11. Dit Handreikingsprofiel is (op een andere schaal) met de doorgetrokken paarse lijn weergegeven in Figuur 15. Vanwege de verschillen is tussen model en meting (zie Figuur 14) kan de feitelijke magneetveldsterkte lager of hoger uitvallen. Om

de maximale grootte van het verschil in te schatten is de theoretische onzekerheidsmarge van 13,9% gebruikt (Bijlage 2). Deze wordt gebruikt omdat de onzekerheid die uit de verschilmeting volgt voor afstanden groter dan 30 m kleiner is dan deze theoretische onzekerheidsmarge (Figuur 17). In het gebied rond 50 m, de grens van de magneetveldzone berekend volgens de Handreiking, levert de theoretische onzekerheidsmarge daarmee een 'worst case'-schatting op voor het verschil tussen gemodelleerde en gemeten magneetveldsterkte. Op deze manier is op elke afstand een minimum- en een maximumschatting voor de magneetveldsterkte bepaald. In deze schatting zijn de verschillen tussen gemodelleerde en gemeten magneetveldsterkte en de onzekerheden daarin verrekend. De paarse streepjeslijnen in Figuur 15 rond de gemodelleerde magneetveldsterkte (paarse getrokken lijn) geven dit gebied weer. Verder is in Figuur 15 nog als vergelijking het gemodelleerde magneetveld opgenomen op basis van de gemiddelde stroom over de meetperiode van 328,9 A (blauwe getrokken lijn, zie ook Figuur 13). Het verschil tussen de blauwe en de paarse getrokken lijn ontstaat omdat de modelberekening voor de paarse lijn uitgaat van 1200 A en voor de blauwe lijn van 328,9 A.

Uit Figuur 15 kan worden afgeleid wat de verschillen tussen de gemodelleerde en gemeten magneetveldsterkte voor de breedte van de specifieke magneetveldzone (berekend volgens de Handreiking) betekenen. De specifieke zone berekend volgens de Handreiking heeft een breedte van 50,5 m. De minimale schatting voor de zonebreedte op basis van de theoretische onzekerheidsmarge bedraagt 47,3 m en de maximale schatting 53,3 m.



Figuur 15. Vergelijking tussen de meetperiode en de berekening zoals voorgeschreven in de Handreiking bij 30% van de ontwerpstroom

Als gevolg van de verschillen tussen model en meting kan het gebied waarbinnen de 0,4 microtesla wordt overschreden 3,2 m smaller zijn dan de Handreikingszone of 2,8 m breder. Deze verschillen vallen binnen de marge van ±5 m die het ministerie in de uitvoeringspraktijk acceptabel vindt. Allereerst omdat de afronding volgens de Handreiking op het dichtstbijzijnde vijfvoud al een verschil van (bijna) 5 m oplevert. Verder heeft het ministerie van IenM

aangegeven dat zoneberekeningen van verschillende adviesbureaus voldoende moeten overeenstemmen. Als criterium voor 'voldoende overeenstemming' formuleerde het ministerie van IenM dat alle berekende zonebreedtes binnen 5 m van het gemiddelde moesten liggen [8]. Deze marge is bevestigd in de toepassingstest van Handreiking versie 3.1 [9]. Daar gaf het ministerie als criterium voor voldoende overeenstemming aan dat alle berekende grids ten opzichte van het mediane grid niet meer dan 5 m mogen afwijken.

5 Discussie

5.1 Nulmeting

Gemiddeld over de 24 uur van de nulmeting verschilt het 50 Hz-magneetveld op geen enkele positie van nul. Er zijn geen andere 50 Hz-magneetveldbronnen aanwezig (of in werking) en er is geen 50 Hz-achtergrondmagneetveld. De metingen van het magneetveld na ingebruikname geven daarom zuiver en alleen het magneetveld van de nieuwe hoogspanningslijn.

5.2 Model, meting en magneetveldzone volgens de Handreiking

Uit de analyse blijkt dat model en meting in voldoende mate overeenstemmen (Figuur 15). Door de verschillen tussen gemodelleerd en gemeten magneetveld kan de zone waar de 0,4 microtesla wordt overschreden smaller of breder zijn dan de volgens de Handreiking berekende magneetveldzone. Voor de situatie nabij Rokkeveen geldt dat de breedte van de zone waar de 0,4 microtesla kan worden overschreden ligt tussen 47,3 m en 53,3 m. Deze verschillen (-3,2 m, +2,8 m) vallen binnen de marge van ± 5 m die het ministerie van IenM in de uitvoeringspraktijk acceptabel vindt.

5.3 Verschillen model en meting

Bij het bepalen van de magneetveldzone volgens de Handreiking is vooral de afstand waarop de magneetveldsterkte onder de 0,4 microtesla daalt van belang. Voor de hoogspanningslijn nabij Rokkeveen ligt deze afstand rond de 50 m. Op die afstand komen model en meting voldoende overeen (Figuur 13). Voor meetposities vanaf 40 m is het verschil tussen model en meting minder dan 0,03 microtesla en past het verschil binnen de theoretisch verwachte onzekerheidsmarge (Figuur 17). Uit Figuur 13 blijkt dat de overeenstemming tussen model en meting dichter bij de hoogspanningslijn minder goed is. Dit was ook het geval bij het validatieonderzoek in Maartensdijk [5]. Er is een aantal mogelijke verklaringen denkbaar voor het feit dat model en meting dicht bij de hartlijn minder goed overeenkomen. In het rapport over het validatieonderzoek in Maartensdijk [5] en in Bijlage 4 wordt daar nader op ingegaan.

5.4 Evaluatie prestatie magneetveldmeters

Door uitval van de meters kon de evaluatie van het verschil tussen gemodelleerde en gemeten magneetveldsterkte niet optimaal worden uitgevoerd. Twee meters hebben in het geheel niet gemeten en twee meters hebben gedurende een deel van de meetperiode gefunctioneerd. Ondanks dit verlies aan gegevens blijven er in totaal 1390 meetpunten over waarop het gemodelleerde magneetveld direct kan worden vergeleken met het gemeten magneetveld. Dat is voldoende om een valide vergelijking tussen model en meting mogelijk te maken.

Nader onderzoek heeft geen bevredigende verklaring voor het uitvallen van de magneetveldmeters opgeleverd.

6 Conclusies

Het RIVM trekt de volgende conclusies naar aanleiding van de metingen in Rokkeveen:

- Verschillen tussen gemodelleerde en gemeten magneetveldsterkte kunnen ertoe leiden dat de werkelijke zone waar de magneetveldsterkte van 0,4 microtesla wordt overschreden verschilt van de volgens de Handreiking berekende magneetveldzone.
- Voor de situatie nabij Rokkeveen valt dat verschil in zonebreedte binnen de marge van ±5 m die in de uitvoeringspraktijk van het Nederlandse voorzorgsbeleid door het ministerie van IenM wordt geaccepteerd.
- De meting die is uitgevoerd voordat de hoogspanningslijn in gebruik werd genomen (nulmeting) laat zien dat het 50 Hz-magneetveld op de meetlocatie gemiddeld over 24 uur overal nul is.
- Net als bij het validatieonderzoek in Maartensdijk geldt voor de situatie nabij Rokkeveen dat de gemodelleerde en gemeten magneetveldsterkte op grotere afstand van de hoogspanningslijn voldoende overeenkomen en dat dichter bij de hoogspanningslijn de overeenstemming minder goed is.
- Bij de meting na ingebruikname van de hoogspanningslijn in Rokkeveen hebben vier magneetveldmeters niet goed gefunctioneerd. Hoewel niet optimaal, blijven er voldoende metingen (1390) over om een valide vergelijking tussen model en meting mogelijk te maken.

Referenties

1 Ministerie van VROM (2005). Advies (en bijlage) met betrekking tot hoogspanningslijnen van voormalig staatssecretaris Van Geel van VROM aan Colleges van Burgemeester en Wethouders, Colleges van Gedeputeerde Staten, IPO, VNG, EnergieNed, Netbeheerders Elektriciteit, gedateerd 3 oktober 2005, kenmerk SAS/2005183118. Zie onder aan webpagina www.rivm.nl/Onderwerpen/Onderwerpen/H/Hoogspanningslijnen

2 Ministerie van VROM (2008). Verduidelijking advies met betrekking tot hoogspanningslijnen. Brief minister Cramer van VROM, gedateerd 4 november 2008, kenmerk DGM\2008105664. Zie onder aan webpagina www.rivm.nl/Onderwerpen/Onderwerpen/H/Hoogspanningslijnen

3 Kelfkens, G. en M.J.M. Pruppers (2014). *Handreiking voor het berekenen van de breedte van de specifieke magneetveldzone bij bovengrondse hoogspanningslijnen.* Versie 4.0, RIVM, 3 november 2014.

4 Kelfkens G. en M.J.M. Pruppers (2007). *Achtergronden beleid bovengrondse hoogspanningslijnen*. RIVM, Bilthoven, Rapport 861020014, 2007.

5 Bolte, J.F.B., M.A.M. Beerlage, G. Kelfkens en M.J.M. Pruppers (2014). *Validatieonderzoek berekeningsmethodiek magneetveldzone in Maartensdijk.* RIVM Rapport 2014-0133.

6 Stichting De Groene Landscheiding N470 (2008). Brief aan de ministers M.J.A. van der Hoeven (Economische Zalen) en J. Cramer (Volkshuisvesting, ruimtelijke Ordening en Milieubeheer), kenmerk 08HWE/PKU023, Zoetermeer, 20 augustus 2008.

7 Ministerie van VROM (2009). Brief van minister Jacqueline Cramer (Volkshuisvesting, ruimtelijke Ordening en Milieubeheer), in antwoord op Stichting de Groene Landscheiding N470, 31 maart 2009, onderwerp: 'antwoord op uw vragen over Randstad 380 kV', kenmerk: RB/2009017875.

8 Kelfkens, G. en M.J.M. Pruppers (2011). *Berekeningsmethoden magneetveldzone.* RIVM Rapport 610790015, 2011.

9 Kelfkens, G., O.R.P. Breugelmans en M.J.M. Pruppers (2014). *Toepassingstest 'Handreiking 3.1 specifieke magneetveldzone bij hoogspanningslijnen'.* RIVM Rapport 2014-0095.

10 Baumann, J. en S. Joss (2007). *Hochspannungsleitungen. Vollzugshilfe zur NISV. Vollzugs-, Berechnungs- und Messempfehlung.* Entwurf zur Erprobung, Juni 2007 Umwelt-Vollzug. Bundesamt für Umwelt, Bern, 2007.

Bijlage 1 Configuratiegegevens hoogspanningslijn

Door het TenneT Asset Informatieloket zijn voor de masten 43 en 44 van de hoogspanningsverbinding Wateringen-Bleiswijk de volgende gegevens verstrekt.

Masten

mast	uitvoering	hoogte (m)	RDX	RDY
WTR-BWK380 043_A	W2S400_A_WTR-BWK380	52	93459,171	449633,751
WTR-BWK380 043_B	W2S400_B_WTR-BWK380	52	93459,223	449617,337
WTR-BWK380 044_A	W2S400_A_WTR-BWK380	52	93813,389	449634,417
WTR-BWK380 044_B	W2S400_B_WTR-BWK380	52	93813,441	449617,978

mast	RDX mastmidden	RDY mastmidden
43	93459,197	449625,544
44	93813,415	449626,198

Veldlengte (afstand mastmiddens): 354,2 m.

Geleiders
- De fasegeleiders zijn van het type AMS620.
- De bliksemdraad en compensatiedraden (2-bundel) zijn van het type Hawk.

De ontwerpbelasting is per circuit 2635 MVA, ontwerpstroom: 4000 A.

Doorhang

circuit zwart	hoogte boven maaiveld midspan (m)
fase boven	37,74
fase midden	27,79
fase onder	17,91

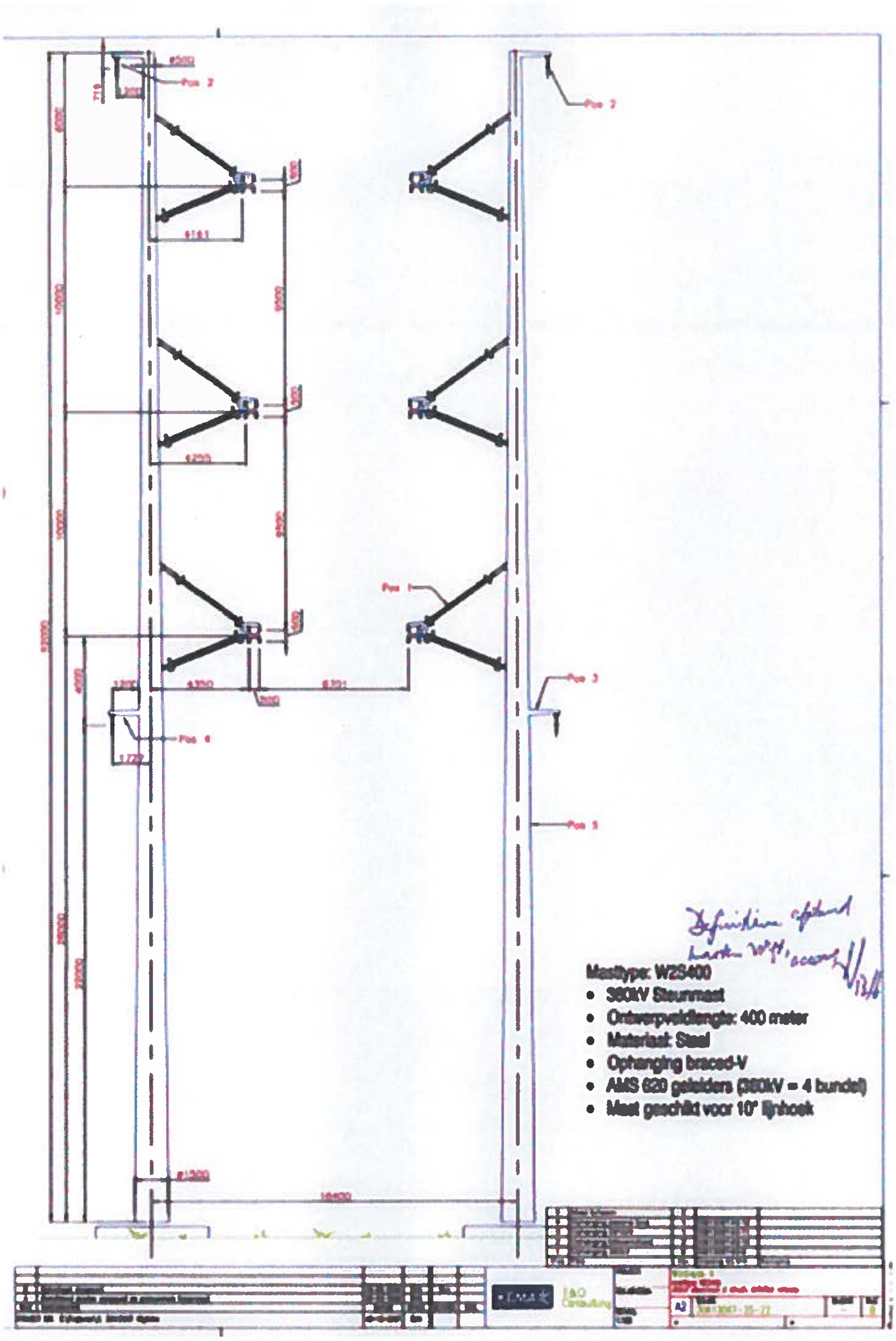
circuit wit	hoogte boven maaiveld midspan (m)
fase boven	37,54
fase midden	27,67
fase onder	17,83

Klokgetallen
De klokgetallen voor de verbinding Wateringen-Bleiswijk zijn:

positie	klokgetal circuit zwart	klokgetal circuit wit
fase boven	8 (240°)	12 (0°)
fase midden	4 (120°)	4 (120°)
fase onder	12 (0°)	8 (240°)

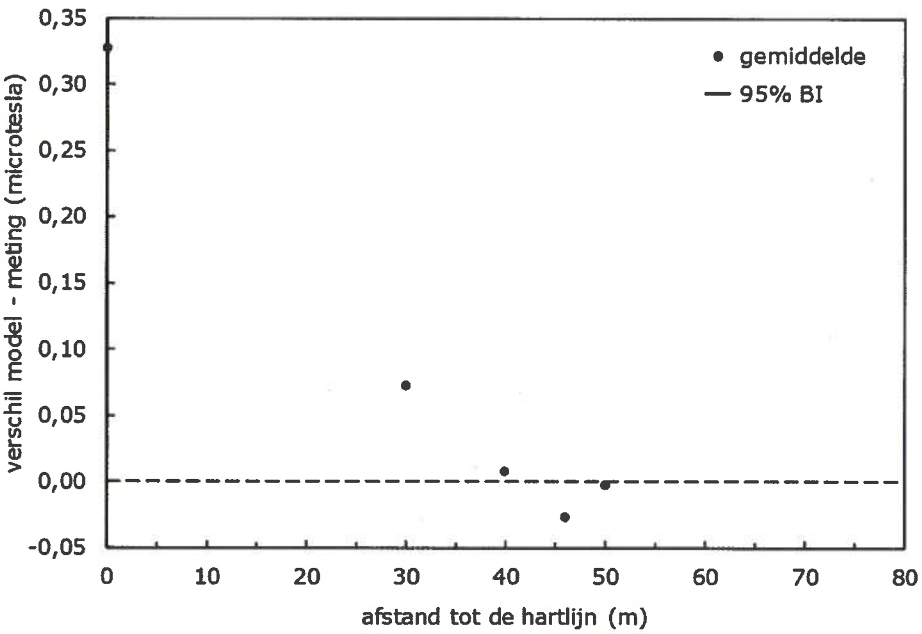
Mastbeeld

De overige gegevens (ophanghoogte geleiders, laterale afstand) zijn ontleend aan de afmetingen in het mastbeeld:



Bijlage 2 Verschil modelberekening en meting en onzekerheid daarin

Verschil modelberekening en meting
In Figuur 16 (en Figuur 14) is het verschil weergegeven tussen het gemodelleerde en gemeten magneetveld op de vijf meetposities. Eerst is op elke meetpositie en op elk 5-minutentijdstip het verschil tussen het gemodelleerde en het gemeten magneetveld bepaald. Vervolgens is deze tijdreeks gemiddeld over de gehele meetperiode. Naast het gemiddelde verschil tussen gemodelleerde en gemeten magneetveldsterkte is ook het 95%-betrouwbaarheidsinterval voor dit verschil weergegeven. Dat betrouwbaarheidsinterval is niet zichtbaar, omdat het kleiner dan de bolletjes van de meetpunten is.



Figuur 16. Verschil tussen gemodelleerd en gemeten magneetveld gemiddeld over de meetperiode en het betrouwbaarheidsinterval voor dat gemiddelde. Het 95%-betrouwbaarheidsinterval is niet zichtbaar omdat het binnen de bolletjes ligt

In het centrale punt is er een groter verschil tussen de metingen en het model. Het model voorspelt een magneetveldsterkte die 0,33 microtesla hoger is dan de werkelijk gemeten waarde. Naarmate de meetposities verder uit het hart van de lijn liggen, neemt het verschil tussen model en meting af. Op 30 m uit het hart van de lijn ligt de gemodelleerde waarde van de magneetveldsterkte nog 0,07 microtesla boven de gemeten waarde. Vanaf 40 m komen meting en model binnen 0,03 microtesla overeen.

Op zichzelf zeggen deze absolute verschillen niet veel, want zowel de meting als de modelberekening hebben een zekere onnauwkeurigheid op grond waarvan afwijking van het verschil tussen model en meting van nul mogelijk en verklaarbaar zijn. Om de betekenis van de in Figuur 16 waargenomen verschillen te kunnen beoordelen, is een schatting nodig van de (theoretische)

onzekerheid in het verschil tussen gemodelleerd en gemeten magneetveldsterkte.

Bepaling theoretisch onzekerheidsmarge tijdens de meetperiode
De onzekerheidsmarge in het verschil tussen gemodelleerd en gemeten magneetveldsterkte wordt bepaald door standaardonzekerheid in berekenen en meten. Het gaat daarbij om de volgende factoren:

Magneetveldmeting
- onnauwkeurigheid meters;
- temperatuurafhankelijkheid meters;
- variatie in geleiderafstand (uitzwaaien, doorhangen);
- mogelijke andere magneetveldbronnen in de buurt.

Stroommeting
- onnauwkeurigheid teruggerekende circuitstroom;
- onbalans stromen, tijdsmiddeling enzovoort.

Modelberekening
- onnauwkeurigheid stroom omgerekend naar magneetveld;
- modelbijdrage algemeen.

Deze tien bijdragen samen bepalen de (theoretische) standaardonzekerheid in het verschil tussen gemodelleerde en gemeten magneetveldsterkte. Hieruit kan de (theoretische) onzekerheidsmarge voor het verschil model en meting worden afgeleid.

Voor elk van de tien bovengenoemde factoren wordt de standaardonzekerheid geschat. Soms kan die direct uit de documentatie van de apparatuur worden afgeleid, soms is een 'educated guess' nodig. Om de geschatte onzekerheid om te rekenen naar de standaardonzekerheid is voor elke bijdragende factor een conversiefactor (k_p) nodig. De manier waarop de onnauwkeurigheid is geschat, bepaalt de grootte van k_p. Als de schatting gebaseerd is op een normale verdeling, zoals bij een kalibratiecertificaat meestal het geval is, bedraagt k_p 2. Als de schatting gebaseerd is op een rechthoekige verdeling, zoals bij de specificaties van een apparaat meestal het geval is, bedraagt de k_p $\sqrt{3}$. Is de onzekerheidsbijdrage al een standaardonzekerheid, zoals bij de onnauwkeurigheid van de stroommeting op het station, dan is k_p=1 [10].

De totale onzekerheid in het verschil van modelberekening en meting wordt bepaald door de verschillende bijdragen kwadratisch op te tellen:

$$u = \sqrt{\sum_p u_p^2}$$

De gegevens voor het bepalen van de theoretische onzekerheidsmarge tijdens de meting zijn weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2. Kwantitatieve gegevens voor de schatting van de theoretische onzekerheid tijdens de meetperiode (I=328,9 A)

invloedsfactor (*p*)	**bijdrage U_p (%)**	**herkomst U_p**	**conversie factor k_p**	**standaard onzekerheid u_p%**
veldsterktemeting				
onnauwkeurigheid magneetveldmeter	4	specificatie	√3	2,3
temperatuurafhankelijkheid magneetveldmeter (3% per 10 °C)	4,5	specificatie	√3	2,6
variatie in geleiderafstand	4	schatting	1	4
nabijheid andere bronnen	0	schatting	1	0
	totale onnauwkeurigheid veldsterktemeting			**5,3**
stroommeting				
onnauwkeurigheid meting op station	9,7	schatting	1	9,7
onbalans stromen, tijdsmiddeling enzovoort	1	schatting	1	1
	totale onnauwkeurigheid stroommeting			**9,8**
modelberekening				
doorwerking onnauwkeurigheid I in B	9,8	schatting	1	9,8
overige onnauwkeurigheid model	3,0	schatting	1	3,0
	totale onnauwkeurigheid modelberekening			**10,3**

Toelichting op Tabel 2:

- De meetonnauwkeurigheid van de magneetveldmeters is volgens de specificaties ±2-4%. Omdat de veldsterkte relatief laag is en het meetbereik van 40 Hz tot 1000 Hz (niet alleen 50 Hz) loopt, wordt van 4% uitgegaan.
- De meetonnauwkeurigheid van de magneetveldmeters is temperatuurafhankelijk. De specificatie is bij 27 °C. De temperatuur tijdens de metingen was circa 12 °C (zie paragraaf 3.1), wat neerkomt op 4,5% extra onnauwkeurigheid.
- De geleiderafstand varieert doordat de doorhang van de geleiders verandert (als gevolg van de stroom) en de geleiders uitzwaaien onder invloed van de wind. Deze bijdrage is geschat op 4%.
- De nulmeting in Rokkeveen heeft laten zien dat er geen andere bronnen van 50 Hz-velden aanwezig zijn. Hoewel het niet geheel uitgesloten is dat er metaal in de grond of sloot ligt waarin de hoogspanningslijn een magneetveld induceert, gaan we ervan uit dat de (onzekerheids)bijdrage van andere bronnen nihil is.
- De onnauwkeurigheid in de uit de metingen op station Bleiswijk teruggerekende stroom bedraagt 9,7% (zie Bijlage 3).
- De fasestromen kunnen in onbalans zijn en er kunnen verschuivingen in de tijdsbepaling van de meting zitten. Hiervoor wordt een correctie van 1% in rekening gebracht.

- Op elke locatie is het magneetveld evenredig met de stroom. De onnauwkeurigheid van 9,8% in de stroombepaling leidt daarmee tot een onnauwkeurigheid van 9,8% in het gemodelleerde magneetveld.
- Behalve de stroom dragen ook andere modelparameters (afmetingen, mastposities, doorhang, enzovoort) bij aan de onnauwkeurigheid in de modellering. Deze onnauwkeurigheid wordt geschat op 3% [10].

De totale onzekerheid in het verschil tussen modelberekening en veldsterktemeting is opgebouwd uit de onnauwkeurigheid in de metingen en in de modellering. Deze is weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3. Totale standaardonzekerheid in het verschil tussen gemodelleerde en gemeten magneetveldsterkte tijdens de meetperiode (I=328,9 A). De totale onzekerheid ontstaat door kwadratisch optellen van de twee bijdragen.

onnauwkeurigheid in verschil meting en model	
onnauwkeurigheid veldsterktemeting	5,3
onnauwkeurigheid modelberekening	10,3
totale standaardonzekerheid verschil meting en model	**11,5**

Uit de standaardonzekerheid (u_V) in het verschil tussen model en meting kan de theoretische onzekerheidsmarge, ook wel aangeduid als het 95%-betrouwbaarheidsinterval, worden bepaald door:

$$U = 2 \times u_V$$

Voor de meting in Rokkeveen bedraagt de theoretische onzekerheidsmarge voor het verschil tussen de gemodelleerde en de gemeten magneetveldsterkte 23,1%.

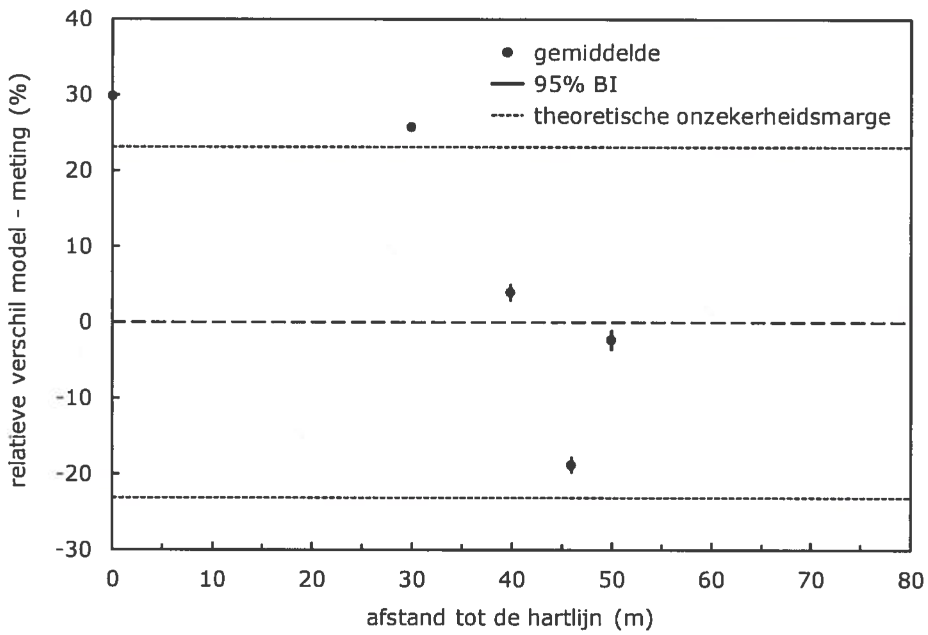
Bij het bepalen van de theoretische onzekerheidsmarge worden alleen 'toevallige' onzekerheden meegenomen. Systematische verschillen tussen modelleren en meten kunnen niet worden opgenomen. Voorbeelden hiervan zijn:
- onnauwkeurigheden in het vaststellen van de locatie van de magneetveldmeters;
- het feit dat de lijn waarlangs gemeten wordt niet loodrecht op de hartlijn staat;
- verschil in tijdsregistratie tussen de magneetveldmeters en de stroommeter;
- een meter die systematisch te hoge of te lage waarden weergeeft, enzovoort.

De meetprocedure is erop gericht deze onzekerheden waar mogelijk te voorkomen of te minimaliseren.

Vergelijking theoretisch onzekerheidsmarge met metingen
Naast de (theoretische) onzekerheidsschatting is het werkelijke, relatieve verschil (*RV*) tussen model en meting bepaald. Daarvoor wordt op elke positie op elk tijdstip het verschil tussen model en meting gedeeld door het gemiddelde van model en meting bepaald:

$$RV = \frac{B_{model} - B_{meting}}{\left(B_{model} + B_{meting}\right)/2}$$

Op elke meetpositie worden deze *RV*'s over de meetperiode gemiddeld en wordt het betrouwbaarheidsinterval in deze gemiddelde *RV* bepaald. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 17. Deze uit de metingen bepaalde *RV* kan worden vergeleken met de theoretische onzekerheidsmarge die eveneens in Figuur 17 is weergegeven.



Figuur 17. Relatief verschil tussen gemodelleerd en gemeten magneetveld gemiddeld over de meetperiode en het betrouwbaarheidsinterval voor dat gemiddelde; voor sommige meetpunten is het betrouwbaarheidsinterval niet zichtbaar omdat het binnen het bolletje valt

Uit Figuur 17 blijkt dat op de centrale meetpositie en op 30 m uit het hart van de lijn het uit de metingen bepaalde relatieve verschil groter is dan op grond van de theoretische onzekerheidsmarge verwacht werd. Voor de overige meetposities (40 m, 46 m en 50 m) valt het gemeten verschil binnen de theoretische verwachting.

Bepaling theoretisch onzekerheidsmarge in de handreikingssituatie
Bij een berekening volgens de Handreiking wordt voor Rokkeveen uitgegaan van een stroom van 1200 A. De relatieve fout in deze stroom is 3,2% (zie Bijlage 3), kleiner dan de onnauwkeurigheid in de stroom van 328,9 A tijdens de meting (9,1%). Dit verschil heeft gevolgen voor de theoretische onzekerheidsmarge. Daarom is die onzekerheidsmarge in Tabel 4 opnieuw berekend voor de situatie waarin de rekenstroom volgens de Handreiking door de hoogspanningslijn loopt.

Tabel 4. Kwantitatieve gegevens voor de schatting van de theoretische onzekerheid met de rekenstroom volgens de Handreiking (1200 A)

invloedsfactor (p)	**bijdrage U_p (%)**	**herkomst U_p**	**conversie factor k_p**	**standaard-onzekerheid u_p %**
Veldsterktemeting				
onnauwkeurigheid magneetveldmeter	4	specificatie	√3	2,3
temperatuurafhankelijkheid magneetveldmeter (3% per 10°C)	4,5	specificatie	√3	2,6
variatie in geleiderafstand	4	schatting	1	4
nabijheid andere bronnen	0	schatting	1	0
		totale onnauwkeurigheid veldsterktemeting		**5,3**
Stroommeting				
onnauwkeurigheid meting op station	3,2	schatting	1	3,2
onbalans stromen, tijdsmiddeling enzovoort	1	schatting	1	1
		totale onnauwkeurigheid stroommeting		**3,4**
Modelberekening				
doorwerking onnauwkeurigheid I in B	3,4	schatting	1	3,4
overige onnauwkeurigheid model	3,0	schatting	1	3,0
		totale onnauwkeurigheid modelberekening		**4,5**

De totale onzekerheid in het verschil tussen modelberekening en veldsterktemeting is opgebouwd uit de onnauwkeurigheid in de metingen en in de modellering. Deze is weergegeven in Tabel 5.

Tabel 5. Totale standaardonzekerheid in het verschil tussen gemodelleerde en gemeten magneetveld met de rekenstroom volgens de Handreiking (1200 A)

onnauwkeurigheid in verschil meting en model	
onnauwkeurigheid veldsterktemeting	5,3
onnauwkeurigheid modelberekening	4,5
totale standaardonzekerheid verschil model en meting	**7,0**

De theoretische onzekerheidsmarge bedraagt weer twee keer de standaardonzekerheid. Dit komt voor de situatie in Rokkeveen neer op een theoretische onzekerheidsmarge voor het verschil tussen de gemodelleerde en de gemeten magneetveldsterkte van 13,9% in de situatie dat er een stroom van 1200 A door de hoogspanningslijn loopt.

Bijlage 3 Schatting van de nauwkeurigheid in de stroommeting

De meetprocedure van TenneT op een station en de daaruit voortvloeiende schatting van de onnauwkeurigheid in de teruggerekende stroom is beschreven in [5]. Deze bijlage bevat een beknopte beschrijving van het bepalen van deze nauwkeurigheid voor de op Station Bleiswijk gebruikte apparatuur.

De spanningstransformator op meetstation Bleiswijk (Trench, SU 420/S22NL) is van nauwkeurigheidsklasse 0,2 en heeft een overzetverhouding van 3800. De meetomvormer op station Bleiswijk (Siemens, SICAM BC 1703 ACP) heeft een nauwkeurigheid van 0,2% Fs voor de spanning, oftewel 760 V. Bij een lijnspanning van 380 kV betekent dit dat de lijnspanning gepresenteerd na de meetomvormer varieert tussen 378,5 kV en 381,5 kV (380±1,5 kV).

De stroomtransformator op station Bleiswijk (Siemens, SU420) is van nauwkeurigheidsklasse 0,2 en heeft een overzetverhouding van 4000. De meetomvormer op station Bleiswijk (Siemens, SICAM BC 1703 ACP) heeft een nauwkeurigheid van 0,2% Fs voor de stroom, oftewel 8 A.

Voor het bepalen van *P* en *Q* heeft de meetwaardeomvormer (Siemens, SICAM BC 1703 ACP) een onnauwkeurigheid van 0,5% Fs.

De onnauwkeurigheid in de gemeten stroom die hieruit volgt is weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6. Onnauwkeurigheid in de na de meetomvormer gepresenteerde stroom volgens NEN-EN-IEC 61869-3 voor de 380 kV-lijn Wateringen-Bleiswijk, nominale stroom 4000 A

% I_n	stroom (A)	presentatie stroom na meetomvormer (A) min	max
5	200	190,5	209,5
20	800	789,2	810,8
100	4000	3984,0	4016,0
120	4800	4782,4	4817,6

P (in MW) en *Q* (in MVAr) worden door de meetwaardeomvormer berekend uit de na de spannings- en stroomtransformator gemeten spanning en stroom volgens:

$$P = U \times I \times \sqrt{3} \times \cos(\varphi) \qquad (\varphi\text{=fasehoek})$$
$$Q = U \times I \times \sqrt{3} \times \sin(\varphi)$$

De maximale waarden $P+\Delta P$ en $Q+\Delta Q$ die *P* en *Q* kunnen aannemen, worden gevonden door in deze formules respectievelijk $(I+\Delta I)$ (kolom 4 in Tabel 6) en $(U+\Delta U)$= 381,5 kV in te vullen. De minimale waarden $P-\Delta P$ en $Q-\Delta Q$ door $(I-\Delta I)$ (kolom 3 in Tabel 6) en $(U-\Delta U)$= 378,5 kV in te vullen. In Tabel 7 zijn de minimale en maximale *P* en *Q*'s opgenomen voor een fasehoeken van 45° (cos(φ)=0,707).

Tabel 7. Enkele voorbeelden van maximale en minimale waarden van P en Q, de fasehoek ϕ=45° en U=380±1,5 kV

% I_n	stroom (A)	*Pmin*= *Qmin* (MW, resp MVAr)	*Pmax*= *Qmax* (MW, resp MVAr)
5	200	79,0	107,1
20	800	357,1	387,5
100	4000	1841,0	1882,2
120	4800	2211,8	2256,0

Omdat de gemeten stroomwaarden niet worden opgeslagen, moeten deze worden teruggerekend uit de opgeslagen waarden voor *P*, *Q* en *U*. Volgens:

$$I = \frac{\sqrt{(P^2 + Q^2)}}{U \cdot \sqrt{3}} \qquad (1)$$

Dit betekent dat de onnauwkeurigheid in de teruggerekende stroom niet alleen afhangt van de onnauwkeurigheid in de stroommeting zelf, maar ook van de onnauwkeurigheid in de gemeten waarde voor *U* en de berekende waarden voor *P* en *Q*. De maximale waarde $I+\Delta I$ die de teruggerekende stroom I in formule (1) kan aannemen, volgt door $P+\Delta P$, $Q+\Delta Q$ en $U-\Delta U$ in de formule in te vullen en de minimale waarde $I-\Delta I$ door $P-\Delta P$, $Q-\Delta Q$ en $U+\Delta U$ in te vullen.

Voor de metingen op station Bleiswijk is deze 'terugrekening' uitgevoerd voor verschillende stroomwaarden, uitgaande van een spanning van 380±1,5 kV en een fasehoek van 45° (cos(ϕ)=0,707). Deze fasehoek is gekozen omdat voor die hoek *P* en *Q* gelijk zijn, wat leidt tot de grootste onnauwkeurigheid in de teruggerekende stroom. Zo'n fasehoek van 45° treedt in de praktijk niet op. In werkelijkheid ligt cos(ϕ) tussen 0,8 en 0,9.

De 'Full Scale' voor *P* van de meetwaardeomvormer bedraagt 2632,7 MW (380.000*4000*√3). Met een onnauwkeurigheid van 0,5% Full Scale betekent dit 13,2 MW. De 'Full Scale' voor *Q* van de meetwaardeomvormer bedraagt 415,7 MVAr, met een onnauwkeurigheid van 13,2 MVAr.

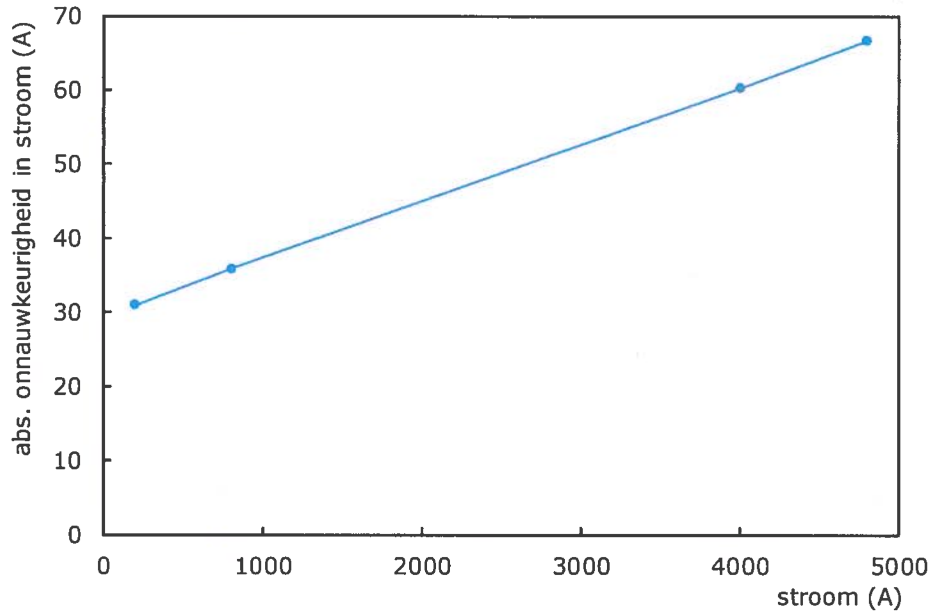
De op deze manier teruggerekende laagste en hoogste schatting voor de stroom (I(minimaal) en I(maximaal)) zijn weergegeven in Tabel 8. ΔI (absoluut) is bepaald uit:

$$\Delta I = (I(\text{maximaal}) - I(\text{minimaal})) / 2$$

Tabel 8. Laagste en hoogste schatting voor de (teruggerekende) stroom en de uit het verschil voortvloeiende meetonnauwkeurigheden

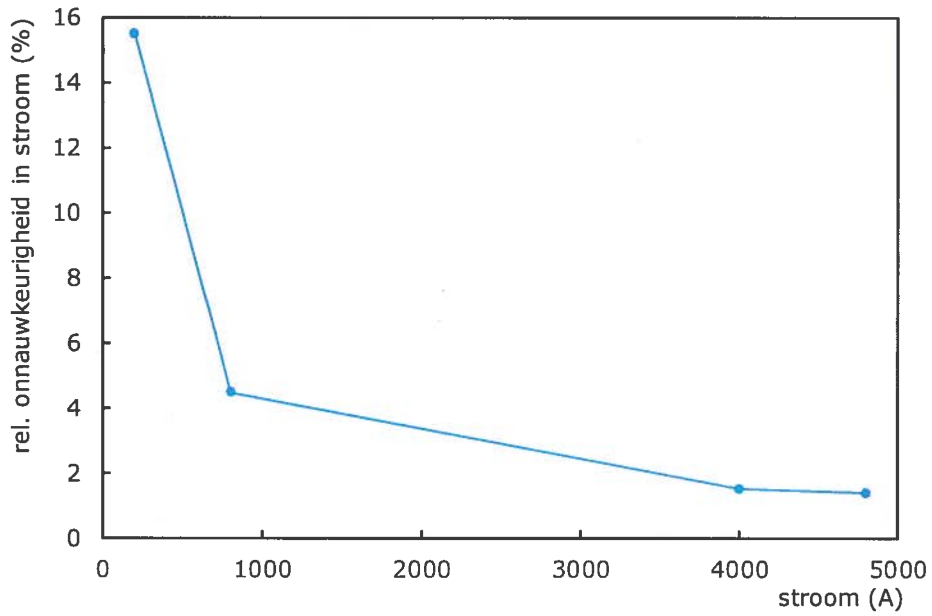
% I_n	stroom (A)	I (min)	I (max)	ΔI (absoluut)	ΔI (relatief)
5	200	169,1	231,1	31,0	15,5%
20	800	764,3	836,0	35,9	4,5%
100	4000	3940,0	4060,5	60,3	1,5%
120	4800	4733,6	4867,0	66,7	1,4%

De onnauwkeurigheid in de circuitstroom is weergegeven in Figuur 18 (absolute onnauwkeurigheid) en in Figuur 19 (relatieve onnauwkeurigheid).



Figuur 18. Weergave van de absolute meetonnauwkeurigheid in de circuitstroom van de 380 kV-verbinding Wateringen-Bleiswijk nabij station Bleiswijk, voor 5, 20, 100 en 120% van de nominale stroom (4000 A)

Bij een berekening volgens de Handreiking wordt uitgegaan van een rekenstroom van 1200 A. Bij deze stroom bedraagt de onnauwkeurigheid 38,8 A (3,1%).

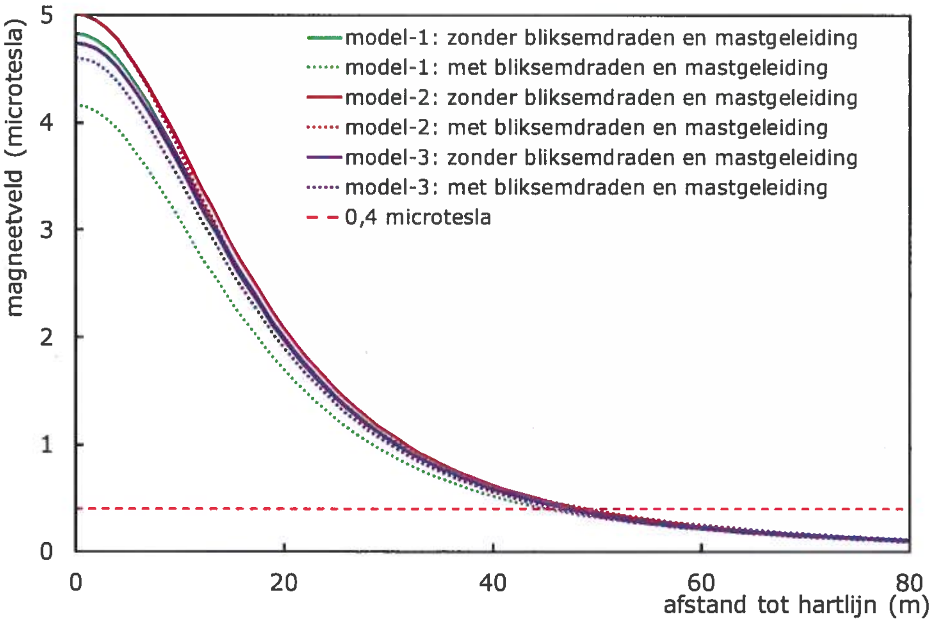


Figuur 19. Weergave van de relatieve meetonnauwkeurigheid in de circuitstroom van de 380 kV-verbinding Wateringen-Bleiswijk nabij station Bleiswijk, voor 5, 20, 100 en 120% van de nominale stroom (4000 A)

Bijlage 4 Oorzaken verschillen gemodelleerd en gemeten magneetveld dicht bij de hoogspanningslijn

In deze bijlage wordt nader ingegaan op de oorzaken van de verschillen tussen het gemodelleerde en gemeten magneetveld dicht bij de hoogspanningslijn.

Allereerst gebruikt een berekening volgens de Handreiking een vereenvoudigde configuratie van de hoogspanningslijn. De bliksemdraden en de compensatiedraden zijn in het rekenmodel weggelaten, de stromen door beide circuits zijn even groot verondersteld en het model is zo ingesteld dat stromen door de mast naar de aarde geen rol spelen. Door deze vereenvoudigingen kan een berekening volgens de Handreiking afwijken van de werkelijke situatie. De meeste van deze vereenvoudigingen hebben vooral effect op de berekende magneetveldsterkte dicht bij de hoogspanningslijn. De toepassingstest van Handreiking 3.0 bevatte een configuratie die lijkt op die in Rokkeveen. Voor deze configuratie is het berekende magneetveld, voor drie verschillende rekenmodellen, weergegeven in Figuur 20.



Figuur 20. Invloed van bliksemdraden en mastgeleiding afgeleid uit het RIVM Rapport 'Berekeningsmethoden magneetveldzone' [8]

Figuur 20 laat een aantal aspecten zien. Allereerst maakt het weglaten van de bliksemdraden voor twee van de drie modellen een duidelijk verschil dat zich het scherpst aftekent in de buurt van de hartlijn. Daarnaast laat Figuur 20 zien dat de invloed van het weglaten van de bliksemdraden afhangt van het gebruikte model: model-1 is er gevoelig voor, model-3 in mindere mate en bij model-2 is er vrijwel geen verschil te zien. Tot slot maakt Figuur 20 duidelijk dat er dicht bij de hoogspanningslijn verschillen tussen de modellen blijven bestaan, ook al worden de bliksemdraden en mastgeleiding buiten beschouwing gelaten. Deze verschillen bedragen in het hart van de lijn maximaal 0,27 microtesla.

Daarnaast heeft de positie van de meters invloed op het verschil tussen de gemodelleerde en gemeten magneetveldsterkte. Het rekenmodel berekent de

magneetveldsterkte op een bepaalde (theoretische) afstand uit het hart van de lijn. Als de meter zich niet precies op die afstand bevindt, zal dat een verschil tussen gemodelleerd en gemeten magneetveld opleveren. Dit verschil zal het grootst zijn als het magneetveld snel verandert met de afstand, in het gebied rond 15-20 m uit het hart van de lijn (zie Figuur 11). Ver van de lijn, waar het magneetveld minder snel met de afstand verandert, telt zo'n onjuiste positionering van de meter minder aan. Ook direct onder de lijn zal dit effect bij Wintrack-masten niet hard aantellen omdat het magneetveldprofiel daar relatief vlak loopt. Bij het validatieonderzoek in Maartensdijk [5] kon voor dit effect worden gecompenseerd omdat daar een volledig meetserie met vier meters ter weerszijden van de hoogspanningslijn beschikbaar was. Omdat in Rokkeveen de meters aan de zuidzijde op één meter na geen bruikbare gegevens hebben opgeleverd, is dat bij de metingen in Rokkeveen niet mogelijk.

Tot slot kunnen niet-zichtbare, metalen, geleidende voorwerpen op de meetlocatie leiden tot verschillen tussen gemodelleerd en gemeten magneetveld. Bij afwezigheid van spanning (tijdens de nulmeting) genereren deze voorwerpen op zichzelf geen magneetvelden. Als er spanning op de hoogspanningslijn staat, kan er een stroom in deze metalen voorwerpen worden geïnduceerd die wel tot een 50 Hz-magneetveld leidt. Met deze mogelijkheid is bij de vergelijking van de gemodelleerde en de gemeten magneetveldsterkte geen rekening gehouden.

RIVM

De zorg voor morgen begint vandaag